



**HAL**  
open science

# Suivi du cycle de l'eau et de la biomasse des surfaces continentales au moyen des données SMOS

Arnaud Mialon

► **To cite this version:**

Arnaud Mialon. Suivi du cycle de l'eau et de la biomasse des surfaces continentales au moyen des données SMOS. Ingénierie de l'environnement. Université Toulouse III Paul Sabatier, 2022. tel-04070359

**HAL Id: tel-04070359**

**<https://hal.science/tel-04070359v1>**

Submitted on 15 Apr 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## UNIVERSITÉ DE TOULOUSE III - PAUL SABATIER

ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'UNIVERS, DE L'ENVIRONNEMENT  
ET DE L'ESPACE (SDU2E)

MÉMOIRE PRÉSENTÉ PAR

**Arnaud MIALON**

EN VUE DE L'OBTENTION DE L'  
HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

---

# **Suivi du cycle de l'eau et de la biomasse des surfaces continentales au moyen des données SMOS**

---

- Agnès Bégué :	Rapporteur
- Catherine Ottlé :	Rapporteur
- Nicolas Delbart :	Rapporteur
- Thierry Pellarin :	Examineur
- Jean-Philippe Gastellu Etchegorry :	Examineur
- Yann Kerr :	Examineur



# Table des matières

	Page
<b>Curriculum Vitae</b>	<b>4</b>
<b>Listes des Publications</b>	<b>12</b>
<b>Acronymes</b>	<b>21</b>
<b>Introduction</b>	<b>23</b>
<b>1 Contexte</b>	<b>25</b>
1.1 Mission SMOS . . . . .	25
1.2 Principe de l'inversion des données SMOS pour la mesure de l'humidité . . . . .	27
1.3 TB modélisées et Transfert radiatif . . . . .	28
<b>2 Comment obtenir de longues séries temporelles de SM, fiables et de qualité</b>	<b>29</b>
2.1 Constante diélectrique du sol . . . . .	29
2.2 Effets de rugosité . . . . .	30
2.3 Couche de végétation . . . . .	33
2.4 Algorithme de niveau 3 . . . . .	36
2.5 Algorithmes alternatifs . . . . .	44
2.6 Etalonnage et validation des données . . . . .	47
<b>3 Applications des données géophysiques pour le suivi climatique</b>	<b>50</b>
3.1 VOD et lien avec la biomasse . . . . .	50
3.2 Tendances d'indices de végétation . . . . .	55
3.3 Hautes latitudes et pergélisol . . . . .	59
<b>4 Perspectives de recherche</b>	<b>63</b>
<b>Appendices</b>	<b>68</b>
<b>A Campagnes de terrain</b>	<b>68</b>



## Expériences

- Décembre 2008 à Aujourd'hui **Ingénieur de Recherche, IR2, CNRS, CESBIO- UMR5126**, Toulouse, France.  
Chef de Projet et expert en développement et déploiement d'applications sur la mission satellite SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity)
- Membre de l'équipe ESL (Expert Support Laboratory) pour l'ESA (Agence Spatiale Européenne). Participe à la calibration et validation des produits humidités du sol, au développement et à l'amélioration des méthodes de traitement des données SMOS
  - Responsable scientifique du développement des chaînes de niveau 3 du CATDS (Centre Aval de Traitement de Données SMOS). Cette chaîne vise à produire des cartes d'humidité de surface, aux résolutions temporelles journalières, 3 jours, décadaire et mensuelles. Participe aux activités de calibration, de validation des produits et au suivi industriel de ces chaînes de traitement
  - Bilan radiatif de la surface : utilisation du modèle de transfert radiatif L-MEB (L-band Microwaves Emission of the BIOSphere), modèle d'émission de la surface dans la gamme spectrale des micro-ondes passives, avec un intérêt plus particulier à la fréquence de 1.4 GHz (bande L)
  - Mesures de terrain (humidité du sol, rugosité de surface). Mise en place et Participation à de nombreuses campagnes *in-situ* pour mesurer des variables de surface : humidité des sols, rugosité de la surface, contenu en eau de la végétation (Australie, France, Antarctique)
- Juin 2006 à Novembre 2008 **Ingénieur de recherche en CDD (Post-Doc)**, CESBIO, UMR 5126, Toulouse, France.
- Préparation à la mission SMOS
  - Création de jeu de données tests
  - Bilan radiatif en bande L
- Octobre 2005 à Février 2006 **Ingénieur de Recherche en CDD**, LGGE, Grenoble, France.
- Etude de la température de surface au Canada, déduite des données satellites mesurées par le capteur SSM/I (micro-ondes passives). Développement d'algorithmes semi-empiriques. Sous la direction de Michel Fily (LGGE) et d'Alain Royer (CARTEL).
- Octobre 2002 à Octobre 2005 **Doctorat**.
- Cotutelle de thèse entre : le laboratoire CARTEL, Université de Sherbrooke, Québec Canada, sous la codirection d'Alain Royer ; et le laboratoire LGGE, Université de Grenoble, France, sous la codirection de Michel Fily
  - Etudes des hautes latitudes Nord par radiométrie micro-onde passive à 19 GHz et 37 GHz.
  - Utilisation des données satellites des capteurs SMMR et SSMI pour l'étude des surfaces arctiques, et l'inversion de températures de surface, détection de la présence de neige, et de la fraction d'eau.

---

## Formations

- 2002 – 2005 **Doctorat en cotutelle en Télédétection**, *Université de Sherbrooke, Québec - Canada, CARTEL.*  
Spécialité télédétection  
**et en Physique de l'atmosphère**, *Université de Grenoble, France, LGGE.*  
Spécialité océan et atmosphère
- 2001 – 2002 **DEA Diplôme d'Etudes Approfondies**, *Université Joseph Fourier, Grenoble, France.*  
Spécialité Climat et Physico-chimie de l'atmosphère
- 1999 – 2001 **Licence-Maîtrise**, *Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France.*  
Spécialité Physique
- 1996 – 1999 **Deug**, *Université Claude Bernard, Lyon 1, Lyon, France.*  
Spécialité Physique

---

## Compétences

<u>Scientifique</u>	Transfert radiatif, physique de la mesure en télédétection
<u>OS</u>	Linux, Ubuntu
<u>Programmation</u>	Matlab, Julia
<u>Traitement de données</u>	QGIS, Gdal

---

## Cours, Formation, Communication

### Cours **Interventions dans des formations.**

- SMOS Science workshop : participation au comité d'organisation et en tant qu'intervenant aux formations à l'utilisation des données SMOS organisées par le CESBIO-LOCEAN-ESA, en 2011 à Arles (SMOS Workshop), en 2012 à Toulouse (CESBIO), en 2013 à Toulouse (CESBIO) et en 2015 à Madrid (ESA-ESAC).
- Intervenant sur " Vegetation products from L-band measurements ", au programme de l'ESA " 8th Advanced Training Course on Land Remote Sensing ", Septembre 2018, Leicester (Royaume Uni).
- Intervenant à COSPAR (Committee on Space Research) - Earth Observation Understanding of the Water Cycle, Funceme-Fortaleza, Brésil, 1-12 November 2010.

Evaluateur pour les revues scientifiques suivantes : Remote Sensing of Environment, Journal of Hydrology, Remote Sensing, Geoscience and Remote Sensing Letters, Hydrological Processes, Science Reports, Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Sensors, ...

Congrès RFI Participation au Comité d'organisation du RFI meeting 2019, 23-26 Septembre, Toulouse.

---

## Participation à des projets

- Projet ESA « PMVOS 10 Years of SMOS – Passive Microwave Vegetation Opacity Study (PM-SO-S) » (ESA AO/1-10908/21/NL/IA). juin 2022- mai 2024, budget de 700'000 euros.  
Je suis le responsable scientifique et porteur du projet qui regroupe le consortium comprenant les laboratoires CESBIO, HEMMA (INRAE Avignon), WSL (Suisse), et les entreprises Magellium, et GlobEO. Projet de 2 ans qui début en juin 2022, dans le but de créer des bases de données de VOD et de biomasse à partir d'observations satellites en bande L, C et X. Ce projet comprend une analyse des tendances ainsi que la comparaison avec des indices optiques de végétation.

- Programme Samuel de Champlain, « Vers une meilleure quantification du changement climatique des régions nordiques canadiennes avec le développement du suivi de variables d'états de surface clés basé sur la télédétection micro-onde », avril 2022 - mars 2024, programme de soutien à la collaboration franco-québécoise.  
Porté par Alexandre ROY (UQTR, Québec Canada) et Marie Parrens (Cesbio/Dynafor Toulouse France). Le budget de 20 k€ pour l'équipe française (Cesbio Toulouse, IMS Bordeaux) permet le soutien de deux stages de master 2 de six mois, plus des échanges de scientifiques en France et au Québec.
- Projet ESA « FRMS4SM, Fiducial Reference Measurements for Soil Moisture », mai 2021 - mai 2023  
Démarré en mai 2021 pour une durée de deux ans, porté par Alexander Boresch (AWST, Vienne), avec les partenaires suivant : AWST (Vienne), TU Wien GEO (Vienne) et CESBIO (Toulouse). Je suis le responsable des tâches pour le CESBIO (tâche 5 du projet, avec un budget 160'000 euros) dont l'objectif principal est de mieux estimer les incertitudes en SM de SMOS à partir du réseau international de mesures *in-situ* ISMN. Trois tâches spécifiques sont développées : i) définition des régions dont l'incertitude des données SMOS est connue ; ii) une étude sur les sols organiques ; iii) étudier l'hétérogénéité spatiale des observations SMOS, par rapport aux conditions de surface autour des sondes de mesures.  
<https://geo.tuwien.ac.at/project-frm4sm/>
- ESA « Carbon Constellation », octobre 2020 - mars 2023  
Projet ESA ITT 1-10109/20/NL/CT porté par Marko Scholze (Université de Lund, Suède). Participation au work package porté par N. Rodriguez-Fernandez (CESBIO).  
<https://lcc.inversion-lab.com/index.html>
- Projet de mission satellite « CryoRad » (2020)  
Participation au projet de mission spatiale "CryoRad", proposé à l'Agence Spatiale Européenne (ESA) fin 2020 (référence : EE11-07-CryoRad) dans le cadre des « Earth Explorer Mission » 10 et 11. La proposition de mission satellite a été portée par Giovanni Macelloni (IFAC, Florence, Italie) pour l'étude de la cryosphère. J'étais en charge de la partie surface émergée, objectifs secondaires de la mission. Proposition non retenue par l'ESA.
- Lefe, Extraction d'Equations par approche Hybride (ExEqHyb) porté par Sylvain Mangiarotti (CESBIO)  
Contribution pour l'extraction et l'expertise des données humidité des sols SMOS.
- ESA « SMOS+Veg »(ESA/ESRIN ITT AO/1-8451/15/NL/SW Support to Science Element), 2016-2017  
Porté par Thomas Kaminski (The Inversion Lab), avec les participations de P. Ferrazzoli (Tor Vergata University), Y. Kerr (CESBIO), W. Knorr (The Inversion Lab), A. Mialon (CESBIO), N. Rodriguez (CESBIO), M. Scholze (Lund University), C. Vittucci (Tor Vergata University), M. Voßbeck (The Inversion Lab), J.-P. Wigneron (INRA).  
<https://eo4society.esa.int/projects/smos-vegetation/>
- ESA « CRYOSMOS », 2014-2016  
Projet ESA, Support to Science Element (STSE) ESA-ITT : AO/1-7758/14/I-NB  
En charge de deux workpackages : i) à propos des données et ii) définition de la roadMap  
Projet porté par G. Macelloni (IFAC - Istituto di Fisica Applicata – CNR – Firenze, Italy) avec les participations de Niels Skou, Steen S. Kristensen, René Forsberg (DTU – Technical University of Denmark - Lyngby, Denmark), G. Picard, M. Leduc-Leballeur, L. Arnaud, M. Fily (LGGE – Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement – Grenoble, France), L. Kaleschke, A. Wernecke (UHAM – University of Hamburg- Hamburg, Germany).  
<https://eo4society.esa.int/projects/cryosmos/>
- CNES « SMOS TE Terres Emergées » pour le programme TOSCA (Terre Océan Surface Continentale Atmosphère)

Participation à la proposition « SMOS Terre Emergée » depuis 2006

Porteur du projet en 2019/20, 2020/21, 2021/22

- SMOS CATDS du CNES  
Participation au développement de chaines des traitements des produits de niveau 3
- SMOS Level 2 de l'ESA  
Participe aux ESL (Expert Support Laboratory) depuis 2006
- « SMOS-IC » SMOS - INRAE CESBIO  
Porté par J-P Wigneron (INRA-e, Bordeaux), j'ai contribué au développement de la maquette et aux premières évolutions de l'algorithme de 2016 à 2018
- NIVO 2018/2019  
porté par G. Picard (IGE, Grenoble, France), Participation aux campagnes de mesures à Dôme C (Antarctique)
- BIPOL 2012/2013  
porté par G. Picard (IGE, Grenoble, France), Participation aux campagnes de mesures à Dôme C (Antarctique)

## Collaborations

Je mentionne quelques collaborations : Université de Trois Rivières, Québec, Canada (Alexandre Roy, Azza Gorrab) ; Université de Sherbrooke, Qc, Canada (Alain Royer) ; IGE, Grenoble (T. Pellarin et G. Picard) ; Gamma-WSL, Zurich, Suisse (Mike Schwank), IMS, Université de Bordeaux, France (François Demontoux) ; FMI, Finlande (Kimmo Rautiainen).

### Stages

- Avril-Août 2020 **Mathilde BARRÉE**, *Master 2*, SUPAERO, CESBIO.
- Utilisation des données du radiomètre LEWIS, inversion SM et VOD pour des surfaces hétérogènes
  - Travaux publiés en 2021, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation
  - Encadrant principal, co-encadrants M. Parrens et T. Pellarin (IGE)
  - Financement CNES
- Jan. - Mai 2020 **Aglaé FARNY**, *Master 1*, Biodiversité Ecologie Evolution parcours Gestion Social de l'Environnement – Valorisation des Ressources Territoriales (BEE parcours GSE-VRT), CESBIO.
- Bilan de Gaz à Effet de Serre du laboratoire CESBIO, analyse d'outils pour le calcul du bilan de Gaz à effet de Serre
  - co-encadrant avec V. Ledantec (M.C. Université Toulouse 3)
- Jan. - Avril 2019 **Clovis FARLEY**, *Stage Etudiant en Physique*, Université de Sherbrooke, Qc, Canada, CARTEL/CESBIO.
- Stage en collaboration avec le CARTEL de l'Université Sherbrooke (Qc, Canada). Le stage a duré 5 mois en 2019 dont 2 mois (février-mars) passés en France au CESBIO.
  - co-encadrant, l'encadrant principal a été Alain Royer CARTEL (Centre d'Applications et de Recherche en TELétection) de l'université de Sherbrooke
  - Analyse des données SM de CCI-SM aux hautes latitudes Nord, au Canada
  - Financement au Québec par le CRSNG, le programme d'échanges France-Québec Samuel de Champlain, Polar Knowledge et l'Agence spatiale Canadienne et en France par le CNES
- 23 mai–15 juin 2018 **Romain BERTELOOT**, *Stage*, prépa INP, laboratoire d'accueil CESBIO.
- sur "l'observation des données de télédétection passive pour la mesure de l'humidité des sols, expérience à St Hilaire du Touvet"
  - en codirection avec Yann H. Kerr.
- printemps 2017 **Bertrand CLUZET**, *Master 2, M2R*, Sciences de l'océan, de l'atmosphère et du climat.
- Evaluation des longues séries temporelles d'humidité du sol
  - co-encadrant, l'encadrant principal a été Némésio Rodriguez.
- Printemps 2016 **Renan TOULLEC**, *Master 2*, INPT-ENSEEIH Ingénieur IMA, laboratoire d'accueil CESBIO.
- Amélioration des effets de surface pour estimer la quantité d'eau des sols dans l'algorithme SMOS à partir de données expérimentales
  - Utilisation des données du site expérimental de SMOSREX
  - co-encadrant avec Marie Parrens (CESBIO).
- Mars-Août 2014 **François GIBON**, *Stage de Fin d'Etude Spécialité Électronique et Technologie Numérique*, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, laboratoire d'accueil CESBIO.
- Modélisation et correction des phénomènes de topographie sur les mesures des températures de brillance SMOS Application au Massif du Vercors"
  - co-encadrant avec Thierry Pellarin (IGE-Grenoble)

- Printemps-Eté 2012 **Clément DUFFOUR**, *Stage Master 2*, Université Diderot Paris, laboratoire d'accueil CESBIO.
- Modélisation de l'influence de la rugosité sur l'émissivité des sols en bande-X
  - encadrant principal Jean-Pierre Wigneron (INRAe), co-encadrants avec Heather Lawrence (INRAe)
- Septembre 2010-Février 2011 **Antoine JEANJEAN**, *Stage de fin d'études*, Ecole Télécom Bretagne, laboratoire d'accueil CESBIO.
- Etude de l'impact des fractions d'eau libre sur les produits SMOS
  - en co-encadrant avec Philippe Richaume

## Thèses

- Octobre 2021-Septembre 2024 **Julio-Cesar Salazar-Neira**, *Thèse*, laboratoires d'accueil : CESBIO.
- Apport de la télédétection en band-L pour l'étude de l'état hydrique de la végétation et le suivi de la biomasse
  - École doctorale ED173 SDU2E Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace
  - Co-encadrant, le directeur de recherche principal est Némésio Rodriguez-Fernandez (CESBIO)
- Octobre 2020-Septembre 2024 **Juliette ORTET**, *cotutelle de thèse*, laboratoires d'accueil : CESBIO et UQTR.
- Mesure et suivi des températures de surface et pergélisol des milieux arctiques par télédétection satellite micro-ondes passives
  - Thèse en cotutelle entre Université du Québec à Trois Rivières (Qc, Canada), Université Paul Sabatier Toulouse 3
  - École doctorale ED173 SDU2E Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace
  - Financements : UQTR et CNES
  - en codirection avec Alexandre Roy, Professeur à l'Université UQTR de Trois-Rivières, Qc, Canada

Je mentionne ci-dessous ma participation non officielle à la thèse suivante :

- 2008-2011 **Silvia JUGLEA**, laboratoire d'accueil CESBIO.
- Simulation de l'humidité des sols/températures de brillance à partir des données *in-situ* dans le cadre de la validation des données SMOS site test Valencia Anchor Station
  - directeur de recherche : Y. H. Kerr
  - soutenue le 3 Janv. 2011
  - 2 papiers publiés en 2010 ont valorisé cette thèse

## CDD-Post doc

- Août 2022 - ... **Simon BOITARD**, *Ingénieur de Recherche*, en CDD CNRS, laboratoire d'accueil CESBIO.
- Projet ESA PMVOS
  - Estimation de la biomasse à partir de VOD multi-fréquence
  - Développement et amélioration de méthodes algorithmiques, basées sur le bilan de transfert radiatif en bande L, C et X
  - Création de jeux de données harmonisés
  - Etude de la synergie de plusieurs bases de données liées à la végétation
  - encadrant principal. Co-encadrants avec N. Rodriguez
- Août 2021 - ... **François GIBON**, *Chercheur*, en Post-Doc, laboratoire d'accueil CESBIO.
- Projet ESA FRM4SM
  - Caractériser les incertitudes en SM de SMOS
  - Evaluation des produits SMOS dans les régions avec un sol riche en matières organiques
  - Etude de l'hétérogénéité spatiale du champs de vue de l'instrument SMOS, en lien avec les inversions en SM
  - en co-encadrants avec P. Richaume et Y.H. Kerr
- Octobre 2018 - Janvier 2022 **Emma BOUSQUET**, *ingénieur de Recherche*, en CDD, laboratoire d'accueil CESBIO.
- Analyse des séries temporelles des L-VOD
  - Comparaison avec d'autres indices de végétation et mesures satellites : LAI Modis, EVI, données bandes C et X d'AMSRE, Température Proba V
  - Régions tropicales, Australie
  - en codirection avec N. Rodriguez-Fernandez et Y. Kerr

## Comité, jury

- Mars 2022 **comité d'experts**, pour le *Fonds de recherche du Québec*, Québec, Canada.
- Membre du comité d'expert en tant que spécialiste en télédétection et en hydrologie pour le *Programme de recherche en partenariat - Agriculture durable*, pour l'évaluation de demandes de subventions pour le Fonds de Recherche du Québec — Nature Technologies (FRQNT).
- Octobre 2018 **Michael PRINCE**, *Maîtrise en science géographiques, cheminement de type recherche*, laboratoire CARTEL, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- Analyse des cycles gel/dégel en forêt boréale par télédétection micro-ondes passives en bande L
  - directeurs de recherche : Alain Royer, Alexandre Langlois et Alexandre Roy

## Listes des Publications

Statistiques selon google scholar : 4653 citations, indice h de 38 et indice i10 de 62.

### Articles

- [A1] E. Bousquet, A. Mialon, N. Rodriguez-Fernandez, S. Mermoz, and Y. Kerr. Monitoring post-fire recovery of various vegetation biomes using multi-wavelength satellite remote sensing. *Biogeosciences*, 19(13) :3317–3336, 2022. doi : 10.5194/bg-19-3317-2022. [31, 4, 4](#)
- [A2] M. Schwank, A. Kontu, **A. Mialon**, R. Naderpour, D. Houtz, J. Lemmetyinen, K. Rautiainen, Qinghuan L., P. Richaume, Y.H. Kerr, and C. Mätzler. Temperature effects on l-band vegetation optical depth of a boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, 263 :112542, 2021. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112542>.
- [A3] R. Olmi, M. Bittelli, G. Picard, L. Arnaud, **A. Mialon**, and S. Priori. Investigating the influence of the grain size and distribution on the macroscopic dielectric properties of antarctic firn. *Cold Regions Science and Technology*, 185 :103254, 2021.
- [A4] E. Bousquet, **A. Mialon**, N. Rodriguez-Fernandez, C. Prigent, F.H. Wagner, and Y.H. Kerr. Influence of surface water variations on vod and biomass estimates from passive microwave sensors. *Remote Sensing of Environment*, 257 :112345, 2021. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112345>.
- [A5] H. Bogena, M. Schrön, J. Jakobi, P. Ney, S. Zacharias, M. Andreasen, R. Baatz, D. Boorman, B. M. Duygu, M. A. Eguibar-Galán, B. Fersch, T. Franke, J. Geris, M. González Sanchis, Y. Kerr, T. Korf, Z. Mengistu, **A. Mialon**, P. Nasta, J. Nitychoruk, V. Pinaras, D. Rasche, R. Rosolem, H. Said, P. Schattan, M. Zreda, S. Achleitner, E. Albentosa-Hernández, Z. Akyürek, T. Blume, A. del Campo, K. Dimitrova-Petrova, J. G. Evans, F. Frances, A. Güntner, F. Herrmann, J. Iwema, K. H. Jensen, H. Kunstmann, A. Lidón, M. C. Looms, S. Oswald, A. Panagopoulos, A. Patil, D. Power, C. Rebmann, N. Romano, L. M. Scheffele, S. Seneviratne, G. Welten, and H. Vereecken. COSMOS-Europe : A European Network of Cosmic-Ray Neutron Soil Moisture Sensors. *Earth System Science Data Discussions*, 2021 :1–33, 2021. doi : 10.5194/essd-2021-325.
- [A6] M. Barrée, **A. Mialon**, T. Pellarin, M. Parrens, R. Biron, F. Lemaître, S. Gascoin, and Y.H. Kerr. Soil moisture and vegetation optical depth retrievals over heterogeneous scenes using LEWIS l-band radiometer. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 102 :1022424, 2021. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102424>.
- [A7] M. Leduc-Leballeur, G. Picard, G. Macelloni, **A. Mialon**, and Y. H. Kerr. Melt in antarctica derived from soil moisture and ocean salinity (smos) observations at l band. *The Cryosphere*, 14(2) :539–548, 2020.
- [A8] **A. Mialon**, N. J Rodríguez-Fernández, M. Santoro, S. Saatchi, S. Mermoz, E. Bousquet, and Y. H. Kerr. Evaluation of the sensitivity of smos l-vod to forest above-ground biomass at global scale. *Remote Sensing*, 12(9) :1450, 2020. [24, 25, 4](#)
- [A9] M. Scholze, T. Kaminski, W. Knorr, M. Voßbeck, M. Wu, P. Ferrazzoli, Y. H. Kerr, **A. Mialon**, P. Richaume, N. Rodríguez-Fernández, et al. Mean european carbon sink over 2010–2015 estimated by simultaneous assimilation of atmospheric co<sub>2</sub>, soil moisture, and vegetation optical depth. *Geophysical Research Letters*, 46(23) :13796–13803, 2019.
- [A10] L. Fan, J.-P. Wigneron, P. Ciais, J. Chave, M. Brandt, R. Fensholt, S. S. Saatchi, A. Bastos, K. Al-Yaari, A. ad Hufkens, Y. Qin, X. Xiao, C. Chen, R. B. Myneni, R. Fernandez-Moran, **A. Mialon**, N.J. Rodriguez-Fernandez, Y.H. Kerr, F. Tian, and J. Peñuelas. Satellite-observed pantropical carbon dynamics. *Nature plants*, 5(9) :944–951, 2019.

- [A11] A. Al-Yaari, J.-P. Wigneron, W. Dorigo, A. Colliander, T. Pellarin, S. Hahn, **A. Mialon**, P. Richaume, R. Fernandez-Moran, L. Fan, Y. H. Kerr, and D. de Lannoy. Assessment and inter-comparison of recently developed/reprocessed microwave satellite soil moisture products using ismn ground-based measurements. Remote sensing of environment, 224 :289–303, 2019.
- [A12] F. Tian, J.-P. Wigneron, P. Ciais, J. Chave, J. Ogée, J. Peñuelas, A. Raebild, J.-C. Domec, X. Tong, M. Brandt, **A. Mialon**, N. Rodríguez-Fernández, T. Tagesson, A. Al-Yaari, Y. Kerr, C. Chen, R.B. Myneni, W. Zhang, J. Ardö, and R. Fensholt. Coupling of ecosystem-scale plant water storage and leaf phenology observed by satellite. Nature Ecology and Evolution, 2 :1428–1435, 2018. doi : <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0630-3>. 4
- [A13] N. J. Rodríguez-Fernández, **A. Mialon**, S. Mermoz, A. Bouvet, P. Richaume, A. Al Bitar, A. Al-Yaari, M. Brandt, T. Kaminski, T. Le Toan, Y. H. Kerr, and J.-P. Wigneron. An evaluation of smos l-band vegetation optical depth (l-vod) data sets : high sensitivity of l-vod to above-ground biomass in africa. Biogeosciences, 15(14) :4627–4645, 2018. doi : 10.5194/bg-15-4627-2018.
- [A14] A. Khazâal, P. Richaume, F. Cabot, E. Anterrieu, **A. Mialon**, and Y. H. Kerr. Improving the spatial bias correction algorithm in smos image reconstruction processor : validation of soil moisture retrievals with in situ data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(1) :277–290, 2018.
- [A15] M. Brandt, Y. Yue, J.-P. Wigneron, X. Tong, F. Tian, M. R. Jepsen, X. Xiao, A. Verger, **A. Mialon**, A. Al-Yaari, K. Wang, and R. Fensholt. Satellite-observed major greening and biomass increase in south china karst during recent decade. Earth’s Future, 6(7) :1017–1028, 2018. doi : 10.1029/2018EF000890.
- [A16] M. Brandt, J.-P. Wigneron, J. Chave, T. Tagesson, J. Penuelas, P. Ciais, K. Rasmussen, F. Tian, C. Mbow, A. Al-Yaari, N. Rodriguez, G. Schurgers, W. Zhang, J. Chang, Y.H. Kerr, A. Verger, C. Tucker, **A. Mialon**, and R. Fensholt. Satellite passive microwaves reveal deforestation and drought-induced carbon losses in africa. Nature Ecology Evolution, Vol. 2 Issue 5 :827–835, 2018. doi : 10.1038/s41559-018-0530-6.
- [A17] A. Bastos, P. Friedlingstein, S. Sitch, C. Chen, **A. Mialon**, J.-P. Wigneron, V. K. Arora, P. R. Briggs, J. G. Canadell, P. Ciais, F. Chevallier, C. Delire, V. Haverd, A. K. Jain, F. Joos, E. Kato, S. Lienert, D. Lombardozzi, J. R. Melton, R. Myneni, J. E.M.S. Nable, J. Pongratz, B. Poulter, C. Rödenbeck, R. Séférian, H. Tian, C. van Eck, N. Viovy, N. Vuichard, A. P. Walker, et al. Impact of the 2015/2016 el niño on the terrestrial carbon cycle constrained by bottom-up and top-down approaches. Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences, 373(1760) :20170304, 2018.
- [A18] J.-P. Wigneron, T.J. Jackson, P. O’Neill, G. de Lannoy, P. de Rosnay, J.P. Walker, P. Ferrazzoli, V. Mironov, S. Bircher, J.P. Grant, M. Kurum, M. Schwank, J. Munoz-Sabater, N. Das, A. Royer, A. Al-Yaari, A. Al Bitar, R. Fernandez-Moran, H. Lawrence, **A. Mialon**, M. Parrens, P. Richaume, S. Delwart, and Y. Kerr. Modelling the passive microwave signature from land surfaces : A review of recent results and application to the L-band SMOS and SMAP soil moisture retrieval algorithms. Remote Sensing of Environment, 192 :238 – 262, 2017. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.024>. 2.3
- [A19] B. Peng, T. Zhao, J. Shi, H. Lu, **A. Mialon**, Y. H. Kerr, X. Liang, and K. Guan. Reappraisal of the roughness effect parameterization schemes for l-band radiometry over bare soil. Remote Sensing of Environment, 199 :63–77, 2017.
- [A20] M. Parrens, J.-P. Wigneron, P. Richaume, A. Al Bitar, **A. Mialon**, R. Fernandez-Moran, A. Al-Yaari, P. O’neill, and Y. Kerr. Considering combined or separated roughness and vegetation effects in soil moisture retrievals. International journal of applied earth observation and geoinformation, 55 :73–86, 2017.

- [A21] M. Parrens, A. Al Bitar, **A. Mialon**, R. Fernandez-Moran, P. Ferrazzoli, Y. H. Kerr, and J.-P. Wigneron. Estimation of the l-band effective scattering albedo of tropical forests using smos observations. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14(8) :1223–1227, 2017. [2.3](#)
- [A22] M. Leduc-Leballeur, G. Picard, G. Macelloni, L. Arnaud, M. Brogioni, **A. Mialon**, and Y.H. Kerr. Influence of snow surface properties on l-band brightness temperature at dome c, antarctica. Remote Sensing of Environment, 199 :427–436, 2017.
- [A23] R. Fernandez-Moran, J.-P. Wigneron, G. De Lannoy, E. Lopez-Baeza, M. Parrens, **A. Mialon**, A. Mahmoodi, A. Al-Yaari, S. Bircher, A. Al Bitar, P. Richaume, and Y. Kerr. A new calibration of the effective scattering albedo and soil roughness parameters in the smos sm retrieval algorithm. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 62(Supplement C) :27 – 38, 2017. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.05.013>. [2.5](#)
- [A24] R. Fernandez-Moran, A. Al-Yaari, **A. Mialon**, A. Mahmoodi, A. Al Bitar, G. De Lannoy, N. Rodriguez-Fernandez, E. Lopez-Baeza, Y. Kerr, and J.-P. Wigneron. SMOS-IC : An Alternative SMOS Soil Moisture and Vegetation Optical Depth Product. Remote Sensing, 9(5), 2017. doi : [10.3390/rs9050457](https://doi.org/10.3390/rs9050457). Article Number 457.
- [A25] A. Al-Yaari, J.-P. Wigneron, Y. Kerr, N. Rodriguez-Fernandez, P.E. O’Neill, T.J. Jackson, G. J. M. De Lannoy, A. Al Bitar, **A. Mialon**, P. Richaume, J. P. Walker, A. Mahmoodi, and S. YuehOTHERS. Evaluating soil moisture retrievals from esa’s smos and nasa’s smap brightness temperature datasets. Remote sensing of environment, 193 :257–273, 2017.
- [A26] A. Al Bitar, **A. Mialon**, Y. Kerr, F. Cabot, P. Richaume, E. Jacqueline, A. Quesney, A. Mahmoodi, S. Tarot, M. Parrens, A. Al-yaari, T. Pellarin, N. Rodriguez-Fernandez, and J.-P. Wigneron. The globl smos level 3 daily soil moisture and brightness temperature maps. Earth System Science Data, 9 :293–315, 2017. doi : [10.5194/essd-2017-1](https://doi.org/10.5194/essd-2017-1). [1.3](#)
- [A27] N. Rodríguez-Fernández, Y.H. Kerr, R. Van der Schalie, A. Al-Yaari, J-P Wigneron, R. De Jeu, P. Richaume, E. Dutra, **A. Mialon**, and M. Drusch. Long term global surface soil moisture fields using an smos-trained neural network applied to amsr-e data. Remote Sensing, 8(11, 959), 2016. doi : [10.3390/rs8110959](https://doi.org/10.3390/rs8110959).
- [A28] T. Pellarin, **A. Mialon**, R. Biron, C. Coulaud, F. Gibon, Y. Kerr, M. Lafaysse, B. Mercier, S. Morin, I. Redor, et al. Three years of l-band brightness temperature measurements in a mountainous area : Topography, vegetation and snowmelt issues. Remote Sensing of Environment, 180 :85–98, 2016. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.047>.
- [A29] M. Parrens, J.-P. Wigneron, P. Richaume, **A. Mialon**, A. Al Bitar, R. Fernandez-Moran, A. Al-Yaari, and Y. H. Kerr. Global-scale surface roughness effects at l-band as estimated from smos observations. Remote Sensing of Environment, 181 :122–136, 2016.
- [A30] D. J. Leroux, T. Pellarin, T. Vischel, J.-M. Cohard, T. Gascon, F. Gibon, **A. Mialon**, S. Galle, C. Peugeot, and L. Seguis. Assimilation of smos soil moisture into a distributed hydrological model and impacts on the water cycle variables over the ouémé catchment in benin. Hydrology & Earth System Sciences, 20(7) :2827–2840, 2016. doi : [10.5194/hess-20-2827-2016](https://doi.org/10.5194/hess-20-2827-2016).
- [A31] Y. H. Kerr, A. Al-Yaari, N. Rodriguez-Fernandez, M. Parrens, B. Molero, D. Leroux, S. Bircher, A. Mahmoodi, **A. Mialon**, P. Richaume, S. Delwart, A. Al Bitar, T. Pellarin, R. Bindlish, T.J. Jackson, C. Rüdiger, P. Waldteufel, S. Mecklenburg, and J.-P. Wigneron. Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation. Remote Sensing of Environment, 180 :40 – 63, 2016. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.042>. Special Issue : ESA’s Soil Moisture and Ocean Salinity Mission - Achievements and Applications.

- [A32] J. P. Grant, J.-P. Wigneron, R.A.M. De Jeu, H. Lawrence, **A. Mialon**, P. Richaume, A. Al Bitar, M. Drusch, M.J.E. Van Marle, and Y. Kerr. Comparison of smos and amsr-e vegetation optical depth to four modis-based vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 172 :87–100, 2016. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.021>.
- [A33] A. Al-Yaari, J.-P. Wigneron, Y. Kerr, R. De Jeu, N. Rodriguez-Fernandez, R. Van Der Schalie, A. Al Bitar, **A. Mialon**, P. Richaume, A. Dolman, and A. Ducharne. Testing regression equations to derive long-term global soil moisture datasets from passive microwave observations. Remote Sensing of Environment, 180 :453–464, 2016. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.022>.
- [A34] A. Roy, A. Royer, C. Derksen, L. Brucker, A. Langlois, **A. Mialon**, and Y. H. Kerr. Evaluation of spaceborne l-band radiometer measurements for terrestrial freeze/thaw retrievals in canada. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(9) :4442–4459, 2015. doi : DOI 10.1109/JSTARS.2015.2476358.
- [A35] B. Montpetit, A. Royer, J.-P. Wigneron, A. Chanzy, and **A. Mialon**. Evaluation of multi-frequency bare soil microwave reflectivity models. Remote Sensing of Environment, 162 :186 – 195, 2015. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.015>.
- [A36] S. Louvet, T. Pellarin, A. Al Bitar, B. Cappelaere, S. Galle, M. Grippa, C. Gruhier, Y. Kerr, T. Lebel, **A. Mialon**, E. Mougin, G. Quantin, P. Richaume, and P. de Rosnay. Smos soil moisture product evaluation over west-africa from local to regional scale. Remote Sensing of Environment, 156 :383 – 394, 2015. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.005>.
- [A37] M. Leduc-Leballeur, G. Picard, **A. Mialon**, L. Arnaud, E. Lefebvre, P. Possenti, and Y. Kerr. Modeling l-band brightness temperature at dome c in antarctica and comparison with smos observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(7) :4022–4032, 2015. doi : 10.1109/TGRS.2015.2388790.
- [A38] R. Fernández-Morán, J.-P. Wigneron, E. Lopez-Baeza, A. Al-Yaari, A. Coll-Pajaron, **A. Mialon**, M. Miernecki, M. Parrens, P. M. Salgado-Hernanz, M. Schwank, S. Wang, and Y. H. Kerr. Roughness and vegetation parameterizations at l-band for soil moisture retrievals over a vineyard field. Remote Sensing of Environment, 170 :269–279, 2015. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.006>.
- [A39] **A. Mialon**, P. Richaume, D. Leroux, S. Bircher, A. Al Bitar, T. Pellarin, J.-P. Wigneron, and Y. H. Kerr. Comparison of dobson and mironov dielectric models in the smos soil moisture retrieval algorithm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(6) :3084–3094, 2015. doi : 10.1109/TGRS.2014.2368585.
- [A40] M. Miernecki, J.-P. Wigneron, E. Lopez-Baeza, Y. Kerr, R. De Jeu, G.J.M. De Lannoy, T. J. Jackson, P. E. O’Neill, M. Schwank, R. Fernandez Moran, S. Bircher, H. Lawrence, **A. Mialon**, A. Al Bitar, and P. Richaume. Comparison of smos and smap soil moisture retrieval approaches using tower-based radiometer data over a vineyard field. Remote Sensing of Environment, 154 :89 – 101, 2014. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.002>.
- [A41] H. Lawrence, J.-P. Wigneron, P. Richaume, N. Novello, J. Grant, **A. Mialon**, A. Al Bitar, O. Merlin, D. Guyon, D. Leroux, S. Bircher, and Y. Kerr. Comparison between smos vegetation optical depth products and modis vegetation indices over crop zones of the usa. Remote Sensing of Environment, 140 :396 – 406, 2014. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.021>.
- [A42] A. Al-Yaari, J.-P. Wigneron, A. Ducharne, Y.H. Kerr, W. Wagner, De Lannoy ; G., R. Reichle, A. Al Bitar, W. Dorigo, P. Richaume, and **A. Mialon**. Global-scale comparison of passive (smos) and active (ascat) satellite based microwave soil moisture retrievals with soil moisture simulations (merra-land). Remote Sensing of Environment, 152 :614 – 626, 2014. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.013>.

- [A43] A. Al-Yaari, J.-P. Wigneron, A. Ducharne, Y. Kerr, P. de Rosnay, R. de Jeu, A. Govind, A. Al Bitar, C. Albergel, J. Muñoz-Sabater, P. Richaume, and **A. Mialon**. Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (smos and amsr-e) with respect to land data assimilation system estimates. Remote Sensing of Environment, 149 :181 – 195, 2014. doi : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.006>.
- [A44] L. Heather, J.-P. Wigneron, F. Demontoux, **A. Mialon**, and Y. H. Kerr. Evaluating the semiempirical h-q model used to calculate the l-band emissivity of a rough bare soil. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51(7) :4075–4084, 2013. doi : [10.1109/TGRS.2012.2226995](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2226995).
- [A45] J.-P. Wigneron, M. Schwank, E. Lopez Baeza, Y. H. Kerr, N. Novello, C. Millan, C. Moisy, P. Richaume, **A. Mialon**, A. Al Bitar, F. Cabot, H. Lawrence, D. Guyon, J. C. Calvet, J. P. Grant, T. Casal, P. de Rosnay, K. Saleh, A. Mahmoodi, S. Delwart, and S. Mecklenburg. First evaluation of the simultaneous smos and elbara-ii observations in the mediterranean region. Remote Sensing of Environment, 124 :26 – 37, 2012. doi : [10.1016/j.rse.2012.04.014](https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.014). [2.3](#)
- [A46] C. Mattar, J.-P. Wigneron, J. A Sobrino, N. Novello, J. C. Calvet, C. Albergel, P. Richaume, **A. Mialon**, D. Guyon, J. C. Jiménez-Muñoz, and Y.H. Kerr. A combined optical–microwave method to retrieve soil moisture over vegetated areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(5) :1404–1413, 2012. doi : [10.1109/TGRS.2011.2179051](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2179051).
- [A47] Y. H. Kerr, P. Waldteufel, P. Richaume, J. P. Wigneron, P. Ferrazzoli, A. Mahmoodi, A. Al Bitar, F. Cabot, C. Gruhier, S. E. Juglea, D. Leroux, **A. Mialon**, and S. Delwart. The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 50(5) :1384 –1403, 2012. doi : [10.1109/TGRS.2012.2184548](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2184548). [2.3](#), [4](#)
- [A48] **A. Mialon**, J.-P. Wigneron, P. De Rosnay, M. J. Escorihuela, and Y. H. Kerr. Evaluating the l-meb model from long-term microwave measurements over a rough field, smosrex 2006. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 50(5) :1458–1467, 2012. doi : [10.1109/TGRS.2011.2178421](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2178421).
- [A49] J.-P. Wigneron, A. Chanzy, Y. H. Kerr, H. Lawrence, J. Shi, M.-J. Escorihuela, V. Mironov, **A. Mialon**, F. Demontoux, P. de Rosnay, and K. Saleh-Contell. Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in L-MEB. IEEE Geosci. Remote, 49 (4) :1175–1189, 2011. doi [10.1109/TGRS.2010.2075935](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2075935). [1.3](#)
- [A50] M. Pardé, M. Zribi, J.-P. Wigneron, M. Dechambre, P. Fanise, Y. Kerr, M. Crapeau, K. Saleh, J.-C. Calvet, C. Albergel, **A. Mialon**, and N. Novello. Soil moisture estimations based on airborne carols l-band microwave data. Remote Sensing, 3(12) :2591–2604, 2011. doi : [10.3390/rs3122591](https://doi.org/10.3390/rs3122591).
- [A51] C. Albergel, E. Zakharova, J.-C. Calvet, M. Zribi, M. Pardé, J.-P. Wigneron, N. Novello, Y. Kerr, **A. Mialon**, and Fritz N.D. A first assessment of the smos data in southwestern france using in situ and airborne soil moisture estimates : The carols airborne campaign. Remote sensing of environment, 115(10) :2718–2728, 2011. doi : [10.1016/j.rse.2011.06.012](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.012).
- [A52] M. Schwank, I. Volksch, J.-P. Wigneron, Y. H. Kerr, **A. Mialon**, P. De Rosnay, and C. Matzler. Comparison of two bare-soil reflectivity models and validation with l-band radiometer measurements. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 48(1) :325–337, 2010.
- [A53] S. Juglea, Y. Kerr, **A. Mialon**, J.-P. Wigneron, E. Lopez-Baeza, A. Cano, A. Albitar, C. Millan-Scheiding, M. Carmen Antolin, and S. Delwart. Modelling soil moisture at smos scale by use of a svat model over the valencia anchor station. Hydrology and Earth System Sciences, 14(5) :831–846, 2010. doi : [10.5194/hess-14-831-2010](https://doi.org/10.5194/hess-14-831-2010).

- [A54] S. Juglea, Y. Kerr, **A. Mialon**, E. Lopez-Baeza, D. Braithwaite, and K. Hsu. Soil moisture modelling of a smos pixel : interest of using the persiann database over the valencia anchor station. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(8) :1509–1525, 2010. doi : 10.5194/hess-14-1509-2010.
- [A55] **A. Mialon**, L. Coret, Y. H. Kerr, F. Sécherre, and J.-P. Wigneron. Flagging the topographic impact on the smos signal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(3) :689–694, 2008. doi : 10.1109/TGRS.2007.914788.
- [A56] **A. Mialon**, A. Royer, M. Fily, and G. Picard. Daily Microwave-Derived Surface Temperature over Canada/Alaska. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(5) :591–604, 05 2007. doi : 10.1175/JAM2485.1.
- [A57] **A. Mialon**, A. Royer, and M. Fily. Wetland seasonal dynamics and interannual variability over northern high latitudes, derived from microwave satellite data. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 110(D17), 2005. doi : 10.1029/2004JD005697.

## Chapitre de Livres

- [L1] Y.H. Kerr, A. Mahmoodi, **A. Mialon**, A. Al Bitar, N. Rodríguez-Fernandez, P. Richaume, F. Cabot, J.-P. Wigneron, P. Waldteufel, P. Ferrazzoli, M. Schwank, and S. Delwart. 4.07 - Soil Moisture Retrieval Algorithms : The SMOS Case. In Shunlin Liang, editor, *Comprehensive Remote Sensing*, pages 156 – 190. Elsevier, Oxford, 2018. doi : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10355-0>.
- [L2] Y. H. Kerr, J.-P. Wigneron, A. Al Bitar, **A. Mialon**, and P.K. Srivastava. Chapter 1 - soil moisture from space : Techniques and limitations. In Prashant K. Srivastava, George P. Petropoulos, and Y. H. Kerr, editors, *Satellite Soil Moisture Retrieval*, pages 3 – 27. Elsevier, 2016. doi : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803388-3.00001-2>.

## Notes Techniques

- [TN1] F. Gibon, **A. Mialon**, P. Richaume, Y. Kerr, A. Mahmoodi, R. Sabia, and A. Boresch. REQ-16 : R&D CASE STUDY 1 SMOS validation and committed areas. Technical Report SO-TN-CB-GS-0104, ESA, May 2022. 52 pages.
- [TN2] CESBIO. Catds level 3 data product description - soil moisture and brightness temperature. Technical Report SO-TN-CB-CA-0001, CBCA, 2021/03/09. version 4a.
- [TN3] A. Mahmoodi, **A. Mialon**, F. Cabot, and Y.H. Kerr. Smos level 3 brightness temperature (tb) users’manual and useful tips quality assessment flags. Technical Report SO-TN-CB-CA-0097, Issue 1.0, CBCA, 2019. 9 p.
- [TN4] Y.H. Kerr, E. Jacquette, A. Al Bitar, F. Cabot, **A. Mialon**, P. Richaume, A. Quesney, and L. Berthon. CATDS SMOS L3 soil moisture retrieval processor Algorithm Theoretical Baseline Document (ATBD) . Technical Report SO-TN-CBSA-GS-0029, Issue 3.0, CBSA, 2019. 78 p.
- [TN5] **A. Mialon**, P. Richaume, C. Suere, and Y.H. Kerr. Study of possible solutions to correct the L3SM processor. Technical report SO-TN-CB-GS-64, Issue : 1.2, CBSA, 2019. Date : 2019/05/28, 17 p.
- [TN6] **A. Mialon**, P. Richaume, M. Schwank, C. Mätzler, R. Naderpour, and Y.H. Kerr. Comparison of L-VOD derived from the 2S and Tau-Omega models. Technical report SO-TN-CB-GS-0081, Issue 1.1, CBSA, 2019. Date : 2019/09/09, 27 Pages.

- [TN7] **A. Mialon**, P. Richaume, and Y.H. Kerr. L3 Correction : Analysis of 8 month run for 2 nodes, centered on the Little Washita site. Technical report SO-TN-CB-GS-77, Issue : 1.1, CBSA, 2019. Date : 2019/05/28.
- [TN8] **A. Mialon**, P. Richaume, and H.Y. Kerr. Correction of L3SM processor : Analysis of 8 months of global run. Technical report SO-TN-CB-GS-0076, Issue : 1.3, CBSA, 2019.
- [TN9] **A. Mialon**, P. Richaume, A. Mahmoodi, and Y.H. Kerr. Using the IMS snow database in the SMOS soil moisture retrieval processor. Technical report SO-TN-CBSA-GS-040 Issue 1.e, CBSA, 2015. Date : 2015/10/12.
- [TN10] **A. Mialon** et al. smos at CESBIO. Technical report SO-TN-CB-CA-0072 issue 1.a, CBSA, 2015. Montée de version des chaînes de traitement du CATDS, processeur SM version 3.00.

## Proceedings

- [P1] J. C. Salazar-Neira, N. J. Rodríguez-Fernández, **A. Mialon**, S. Mermoz, A. Bouvet, Y. Kerr, T. Le Toan, and P. Richaume. Above ground biomass estimation from passive microwaves brightness temperatures using neural networks. In submitted IGARSS 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pages -. IEEE, 2022.
- [P2] F. Demontoux, J.P. Wigneron, **A. Mialon**, A Mavrovic, A Roy, and Y Kerr. A low cost dielectric spectroscopy instrument dedicated to in-situ soil permittivity profile mapping. In 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, pages 6198–6201. IEEE, 2021.
- [P3] F. Demontoux, M. Gati, M. El Boudali, L. Villard, J.-P. Wigneron, T. Koleck, **A. Mialon**, T. Le Toan, and Y. Kerr. Non-intrusive in-situ permittivity measurements dedicated to the development of a p and l band dielectric model of wood. In IGARSS 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pages -. IEEE, 2021.
- [P4] E. Bousquet, **A. Mialon**, N. Rodriguez-Fernandez, C. Prigent, F. Wagner, and Y. H. Kerr. Influence of surface water variations on vod and biomass estimates from passive microwave sensors. In IGARSS 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pages -. IEEE, 2021.
- [P5] Y.H. Kerr, P. Richaume, **A. Mialon**, A. Mahmoodi, E. Bousquet, N. Rodriguez-Fernandez, M. Cabot, F. abd Miernecki, A. Al Bitar, C. Vittucci, J.-P. Wigneron, M. Schwank, K. Rautiainen, and K. Scipal. Smos is ten years old but still going strong. [16th specialist meeting on microwave radiometry and remote sensing of the environment. In Microrad, 2020.
- [P6] F. Demontoux, K. J. Tsague, S. Bircher, Ruffié G., J.-P. Wigneron, **A. Mialon**, and Y.H. Kerr. In-situ multifrequency dielectric measurements to improve soil permittivity models for radiometric observations of soil in the high latitudes. In 16th Specialist Meeting on MICROWAVE RADIOMETRY and REMOTE SENSING of the ENVIRONMENT, 2020.
- [P7] N. J. Rodríguez-Fernández, P. Richaume, E. Bousquet, **A. Mialon**, A. Al Bitar, S. Saatchi, and Y. H. Kerr. Is vegetation optical depth needed to estimate biomass from passive microwave radiometers? a statistical study using neural networks. In IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pages 5496–5499. IEEE, 2019.
- [P8] E. Bousquet, **A. Mialon**, N. J. Rodríguez-Fernández, S. Mermoz, A. Bouvet, O. Merlin, and Y.H. Kerr. Combining l-band radar and smos l-band vod for high resolution estimation of biomass. In IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pages 5508–5511. IEEE, 2019.

- [P9] G. Macelloni, M. Brogioni, M. Leduc-Leballeur, F. Montomoli, A. Bartsch, **A. Mialon**, C. Ritz, J. C. Soteras, D. Stammer, G. Picard, et al. Cryorad : A low frequency wide-band radiometer mission for the study of the cryosphere. In IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pages 1998–2000. IEEE, 2018.
- [P10] R. Fernandez-Moran, J.-P. Wigneron, E. De Lannoy, G. and Lopez-Baeza, **A. Mialon**, A. Mahmoodi, M. Parrens, A. Al Bitar, P. Richaume, and Y. Kerr. Calibrating the effective scattering albedo in the smos algorithm : Some first results. In IGARSS , July 10-15, 2016, Beijing, China., 2016.
- [P11] T. Zhao, J. Shi, D. Li, **A. Mialon**, Y. Kerr, D. Ji, T. Wang, and C. Xiong. Analysis and parameterization of l-band microwave emission from exponentially correlated rough surface. In IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, QC, 2014, pp. 2439-2442, 2014. doi : 10.1109/IGARSS.2014.6946965.
- [P12] T. Zhao, J. Shi, **A. Mialon**, and Y. Kerr. Parameterized exponentially correlated surface emission model for l-band passive microwave soil moisture retrieval. In General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), URSI , vol., no., pp.1,4, 16-23 Aug. 2014, 2014. doi : 10.1109/URSIGASS.2014.6929685.
- [P13] R. Philippe, S. Yan, E. Anterrieu, A. Khazaal, S. Bircher, **A. Mialon**, A. Al Bitar, N. Rodriguez-Fernandez, F. Cabot, Y. Kerr, and A. Mahmoodi. Rfi in smos measurements : Update on detection, localization, mitigation techniques and preliminary quantified impacts on soil moisture products. In 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, pages 223–226, 2014. doi : 10.1109/IGARSS.2014.6946397.
- [P14] M. Parrens, J.-P. Wigneron, P. Richaume, Y. Kerr, S. Wang, A. Alyaari, R. Fernandez-Moran, **A. Mialon**, M. J. Escorihuela, and J. . Grant. Global maps of roughness parameters from l-band smos observations. In 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, pages 4675–4678, 2014.
- [P15] R. Fernandez-Moran, J.-P. Wigneron, E. Lopez-Baeza, P.M. Salgado-Hernanz, **A. Mialon**, M. Miernecki, A. Alyaari, M. Parrens, M. Schwank, S. Wang, A. Coll-Pajaron, H. Lawrence, and Y.H. Kerr. Evaluating the impact of roughness in soil moisture and optical thickness retrievals over the vas area. In IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceeding, Quebec City, QC, 2014.
- [P16] **A. Mialon**, F. Cabot, S. Guibert, A. Al Bitar, P. Richaume, J.-P. Wigneron, T. Pellarin, S. Tarot, S. Bircher, J. Grant, N. Rodriguez-Fernandez, and Y.H. Kerr. Comparison of smos level 2 and level 3 soil moisture at the smosrex site. In 4th International Symposium On Soil Water Measurement Using Capacitance, Impedance and Time Domain Transmission (TDT), July 16-18, 2014, Montreal, QC, Canada, 2014.
- [P17] J.P. Wigneron, Y. Kerr, **A. Mialon**, N. Novello, F. Cabot, S. Delwart, F. Demontoux, M.J. Escorihuela, P. Ferrazzoli, A. Govind, J.P. Grant, D. Guyon, E. Jacqueline, H. Lawrence, E. Lopez-Baeza, A. Mahmoodi, C. Mattar, S. Mecklenburg, C. Moisy, S. Monerris, R. Rahmoune, P. Richaume, P. de Rosnay, C. Rüdiger, K. Saleh, M. Schwank, J. Sobrino, and P. Waldteufel. First evaluation of smos observations and level-2 products over agricultural sites in temperate regions. In RAQRS 2010 E proceedings, 2010.
- [P18] E. Jacqueline, A. Al Bitar, **A. Mialon**, Y.H. Kerr, A. Quesney, F. Cabot, and P. Richaume. Smos catds level 3 global products over land. In proceeding SPIE, sept. 2010, Toulouse, 2010.
- [P19] A. Al Bitar, E. Jacqueline, Y. Kerr, **Arnaud Mialon**, F. Cabot, A. Quesney, O. Merlin, and P. Richaume. Event detection of hydrological processes with passive L-band data from SMOS. In Christopher M. U. Neale and Antonino Maltese, editors, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XII, volume 7824, pages 128 – 136. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2010. doi : 10.1117/12.865074.

[P20] **A. Mialon**, M. Fily, and A. Royer. Seasonal snow cover extent from microwave remote sensing data : comparison with existing ground and satellite based measurements. 2005.

## Acronymes

- AGB	: Above Ground Biomass
- CATDS	: Centre Aval du Traitement des Données SMOS
- CESBIO	: Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère
- CCI	: Climate Change Initiative
- CNES	: Centre National d'Etudes Spatiales
- ECMWF	: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- ESA	: European Space Agency
- ESL	: Expert Support Laboratory
- FRMS4SM	: Fiducial References Measurements for Soil Moisture
- H	: Horizontal
- IFREMER	: Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
- ISMN	: International Soil Moisture Network
- NASA	: National Aeronautics and Space Administration
- OS	: Ocean Salinity
- QA4SM	: Quality Assurance for Soil Moisture
- RFI	: Radio Frequency Interferences
- SM	: Soil Moisture
- SMAP	: Soil Moisture Active Passive
- SMOS	: Soil Moisture and Ocean Salinity
- SMOS-IC	: SMOS- INRA CESBIO
- SSS	: Sea Surface Salinity
- TB	: Température de Brillance
- V	: Vertical
- VOD	: Vegetation Optical Depth
- VWC	: Vegetation Water Content



## Introduction

Les enjeux climatiques sont devenus une préoccupation sociétale importante, notamment concernant les impacts environnementaux en cours et à venir résultant du changement global [Masson-Delmotte et al., 2021]. Les effets observés affectent de nombreuses composantes de notre système climatique, dont le cycle de l'eau [Oki et al., 1999]. Celui-ci est régulé, entre autres, par les flux d'évapotranspirations de la surface et de la végétation, et par les régimes des précipitations [Hohenegger et al., 2009], [Boé, 2013], [He et al., 2021], [Anderegg et al., 2019], [Bonan, 2008]. A l'échelle globale, les projections s'accordent sur le fait que le cycle hydrologique va s'intensifier au cours des décennies à venir [Bates et al., 2008], ce qui signifie une augmentation de l'évaporation, de l'évapotranspiration et des précipitations [Huntington, 2010]. Les scénarii envisagent une hausse globale des précipitations de l'ordre de 1% à 3% par degré de réchauffement [Held and Soden, 2006], mais des disparités régionales existent. Les hautes latitudes et les tropiques connaîtront sans doute une augmentation importante du régime des pluies, tandis que la tendance inverse est attendue pour les zones subtropicales et tempérées [Kundzewicz, 2008]. Cela se traduit par des périodes de sécheresses intenses, comme attendues pour le bassin méditerranéen [Grillakis, 2019], qui vont amplifier les vagues de chaleur [Hirschi et al., 2011], [Wehrli et al., 2019]. Ces effets reflètent les interactions parfois complexes qui existent entre le sol et l'atmosphère [Seneviratne et al., 2010]. Si un lien direct entre la quantité d'eau dans le sol (humidité du sol - Soil Moisture SM) et la température de l'air est bien connu [Seneviratne et al., 2013], le lien entre l'humidité du sol et l'atmosphère est plus complexe à appréhender, notamment le couplage avec les précipitations [Seneviratne et al., 2013], [Berg and Sheffield, 2018]. Composante majeure du cycle hydrologique, l'humidité du sol est identifiée comme une variable essentielle (Essential Climate Variables - ECV) de notre système climatique par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) et le Global Climate Observing System (GCOS) car elle joue un rôle capital à l'interface sol/atmosphère [Seneviratne et al., 2010]. Non seulement elle pilote le bilan d'énergie à la surface terrestre via son rôle sur les flux d'évaporation [Boé, 2013] et de chaleur latente [Lei et al., 2018], mais elle est également un élément important du bilan hydrologique, et donc de l'évolution du couvert végétal car une partie est utilisée pour le développement de la végétation.

Les simulations et les prédictions de l'évolution future du cycle de l'eau sont donc d'une importante capitale, mais sujet à de grandes incertitudes [Seneviratne et al., 2013], [Berg and Sheffield, 2018]. Ainsi le rapport du GIEC [Bates et al., 2008] souligne la nécessité d'approfondir nos connaissances et la modélisation du cycle de l'eau. Pour cela, les recherches doivent bénéficier de bases de données et de mesures d'observations de la Terre de qualité, régulières, et couvrant de longues périodes temporelles [Doherty, 2009], [Bojinski et al., 2014], [Boé, 2013]. Parmi les divers outils utilisés et développés par la communauté scientifique pour le suivi de la quantité d'eau dans le sol à l'échelle globale, on identifie principalement l'observation satellite, la mesure *in-situ* et la modélisation numérique. Les satellites possèdent des atouts particulièrement intéressants pour l'observation de la Terre. Les missions spatiales possèdent des caractéristiques propres qui, suivant les objectifs recherchés, captent des informations à des résolutions spatiales et temporelles variées [Chuvieco, 2008], [Navalgund et al., 2007], [Bonn and Rochon, 1992]. Elles permettent notamment d'acquérir des mesures partout sur le globe et ainsi de pouvoir caractériser les endroits les plus inaccessibles tels que les forêts tropicales ou les régions polaires. Le cas qui nous intéresse plus particulièrement ici est la quantité d'eau dans le sol que nous souhaitons observer à l'échelle globale. Cette donnée est régulièrement acquise par des capteurs installés sur des sites expérimentaux tels que ceux identifiés par le réseau l'International Soil Moisture Network (ISMN). Ce réseau est précieux pour les études en hydrologie, mais nous pouvons constater que ces mesures ne couvrent qu'une partie des terres émergées, et ne permettent donc pas de caractériser l'ensemble des régimes climatiques (figure 1).



FIGURE 1 – Sites *in-situ* de mesures SM du réseau ISMN (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/en/Cartes>). Attention, la présence d’un symbole ne signifie pas que les données *in-situ* correspondent à la période temporelle du satellite SMOS, de Gruber et al. 2020 ©ISMN.

Le principe de la mesure satellite, dite de télédétection, est de mesurer l’énergie d’un rayonnement électromagnétique (EM) émis par une source [Bonn and Rochon, 1992]. Un rayonnement EM est caractérisé par sa longueur d’onde (ou sa fréquence) et l’ensemble des longueurs d’ondes observables constitue le spectre électromagnétique, dont on distingue plusieurs domaines spectraux [Bonn and Rochon, 1996]. Il a été montré depuis longtemps que le domaine des micro-ondes, et plus spécifiquement la gamme 1-5 GHz [Njoku and Entekhabi, 1996], est bien adapté pour accéder à la quantité d’eau du sol [Schmugge, 1978], [Kerr, 2007]. Divers instruments opérant à des fréquences variées ont été utilisés jusqu’à la définition de la mission SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), mission développée par l’ESA et le CNES [Kerr et al., 2001] et lancée en novembre 2009. La NASA contribue également au suivi de cette variable climatique via la mission SMAP (Soil Moisture Active Passive) lancée en 2015. Ces deux missions opèrent à la fréquence de 1.4 GHz (longueur d’onde de 21 cm) qui permet d’obtenir une valeur absolue de l’humidité superficielle des sols (i.e. les premiers centimètres) sur les surfaces continentales avec une incertitude attendue de  $\sim 0.04 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  [Kerr et al., 2001], [Kerr et al., 2010], [Mecklenburg et al., 2012]. De nombreuses analyses sont consacrées au développement des méthodes et algorithmes ainsi qu’à l’évaluation des données SMOS et SMAP [Dong et al., 2020], [Chen et al., 2018] ou de modèles [A31], [A11]. Le but de ce document n’est donc pas de faire une revue complète de la mission, mais plutôt de montrer mon expertise en télédétection, et dans le traitement des données acquises dans la bande spectrale des micro-ondes passives. J’aborderai quelques éléments clés de la mission SMOS traités par l’équipe du CESBIO, qui sont en lien avec mes travaux scientifiques et en lien avec les travaux des personnes qui m’ont accompagné ces dernières années, que ce soit en CDD, en stages ou en post-doc. Nous verrons ainsi que mes recherches portent sur le développement des méthodes et des algorithmes sur les terres émergées pour obtenir deux variables géophysiques liées au sol (humidité superficielle - SM) et à la couche de végétation (Vegetation Optical Depth - VOD). J’aborderai également les activités de validation et de calibration, qui nous sont utiles pour évaluer la qualité de ces données, puis nous verrons finalement les applications développées pour le suivi des écosystèmes. Même si trente années sont recommandées pour évaluer des tendances, SMOS couvre dorénavant plus de douze années, ce qui constitue un jeu de données d’intérêt pour l’évolution de la végétation et de son lien avec l’humidité du sol.

*Dans la suite, les travaux auxquels j’ai participé et qui sont publiés dans des journaux de rang A, sont référencés avec la lettre **A** suivi d’un numéro et indiqués en début de document page 12. Les notes techniques sont repérées par les lettres **TN** suivies d’un chiffre (à la suite de mes publications) de même que les articles parus dans des proceedings qui sont identifiables par la lettre*

**P** suivie d'un numéro. Finalement, les références à d'autres travaux publiés sont identifiées par le nom de l'auteur et l'année de publication de la référence et sont reportés en toute fin de ce document en page 82.

## 1 Contexte

La mission SMOS constitue le cœur de mon travail et de mes recherches depuis mon intégration au CESBIO en 2006 comme ingénieur de recherche, tout d'abord en tant que post-doc, puis en tant que titulaire au CNRS. Je vais donc rappeler dans un premier temps les principales caractéristiques de la mission pour donner quelques définitions utiles pour la suite du document, puis j'aborderai dans un second temps le principe de l'inversion, c'est-à-dire comment obtenir les données géophysiques d'intérêt.

### 1.1 Mission SMOS

SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) est une mission satellite opérée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) [Kerr et al., 2010], [Mecklenburg et al., 2012], dans le cadre des missions d'observation de la Terre (Earth Explorer). Lancée en novembre 2009, la mission a pour objectifs principaux de cartographier à l'échelle globale la salinité des océans (OS) ainsi que l'humidité des sols des surfaces continentales (SM) et le contenu en eau de la végétation (figure 2). Seule la partie surface continentale est abordée dans ce document et il convient de se référer aux travaux de la partie OS pour avoir plus d'informations autour des recherches sur la salinité des océans.

On rappelle ci-dessous les principales caractéristiques de la mission :

- Lancement : novembre 2009
- Disponibilité des données opérationnelles : mai 2010
- Résolution spatiale des observations :  $\sim 43$  km en moyenne
- Fréquence de mesure = 1.4 GHz soit une longueur d'onde  $\lambda = 21$  cm
- Orbite : quasi polaire
- Acquisitions multi-angulaires : les angles entre 0 et  $55^\circ$  sont utilisés pour obtenir l'humidité des sols
- Heures d'observations : 06h00 (18h00) LST (Heure Locale Solaire) au passage de l'Equateur en phase ascendante (descendante) et au nadir
- Résolution temporelle des observations : trois jours à l'équateur

Les jeux de données sont identifiés par niveaux qui sont rappelés brièvement ici car certaines notions associées sont développées dans ce document.

- Niveau 1 ou level 1 (L1) : Températures de Brillance, acquises dans le repère de l'instrument en polarisations X et Y, opérées et diffusées par l'ESA.
- Niveau 2 ou level 2 (L2) : Produits géophysiques SM-VOD, opérés et diffusés par l'ESA ; Ils sont projetés sur la grille isea4h9 à une résolution spatiale de 15km [Sahr et al., 2003]. Les données sont traitées et organisées par demi orbites, en distinguant les orbites ascendantes et les orbites descendantes.
- Niveau 3 ou level 3 (L3) : Synthèses spatio-temporelles de variables géophysiques SM et VOD opérées et diffusées par le CATDS (Centre Aval de Traitement des Données SMOS, développé par l'IFREMER et le CNES). Le niveau 2 de l'ESA constitue le cœur de cette chaîne,

auquel une contrainte est appliquée sur le terme de la végétation pour assurer une continuité temporelle de cette grandeur sur sept jours. Contrairement au niveau 2, les orbites sont regroupées par jour (soit environ 14 orbites journalières) puis agrégées pour obtenir des synthèses temporelles sur trois jours, 10 jours et mensuelles [A26], [TN4]. Ces produits sont obtenus à partir des niveaux L1b (domaine des fréquences spatiales) directement projetés sur la grille EASE-Grid version 2, avec une maille de 25 km x 25 km à 30° de latitude (dont une des caractéristiques est d'avoir des pixels de surface constante, dans notre cas 625 km<sup>2</sup> [Brodzik et al., 2014], [Brodzik et al., 2012]). Les données sont distribuées au format netcdf. Les produits de niveau 3 comprennent également les L3TB produits de températures de brillance, qui contrairement aux produits L1 de l'ESA, sont fournis en polarisation dans le référentiel terrestre, c'est-à-dire en polarisation V et H, et sont corrigés des effets de rotation de polarisations dus à la ionosphère. Deux projections sont utilisées, une cylindrique pour les applications globales et deux polaires (Nord et Sud) pour les applications aux hautes latitudes.

- Niveau 4 ou level 4 (L4) : Cela concerne les applications des données SMOS, en les combinant à d'autres informations telles que des modèles ou encore des données d'autres capteurs satellites (désagrégation, cryosphère ...). Certains de ces produits sont développés dans le cadre du CATDS.

Les algorithmes évoqués dans ce document sont utilisés dans un cadre opérationnel, c'est-à-dire une chaîne de traitement qui produit les données au quotidien. L'équipe du CESBIO est fortement impliquée dans les deux chaînes développées par l'ESA et par le CNES (CATDS). Chaque nouvelle version des algorithmes est donc associée à une version de processeur dont je ferai souvent référence dans ce document pour garder une traçabilité des données utilisées.

Plus de douze années de mesures continues sont actuellement disponibles qui font de la mission SMOS une réussite. Elles constituent un jeu de données précieux pour les études climatiques et les observations des écosystèmes terrestres. Nous allons voir par la suite que je m'intéresse plus particulièrement aux données de températures de brillance du CATDS (L3TB), aux données de SM et de VOD (L2 et L3), et surtout aux applications qui en découlent.

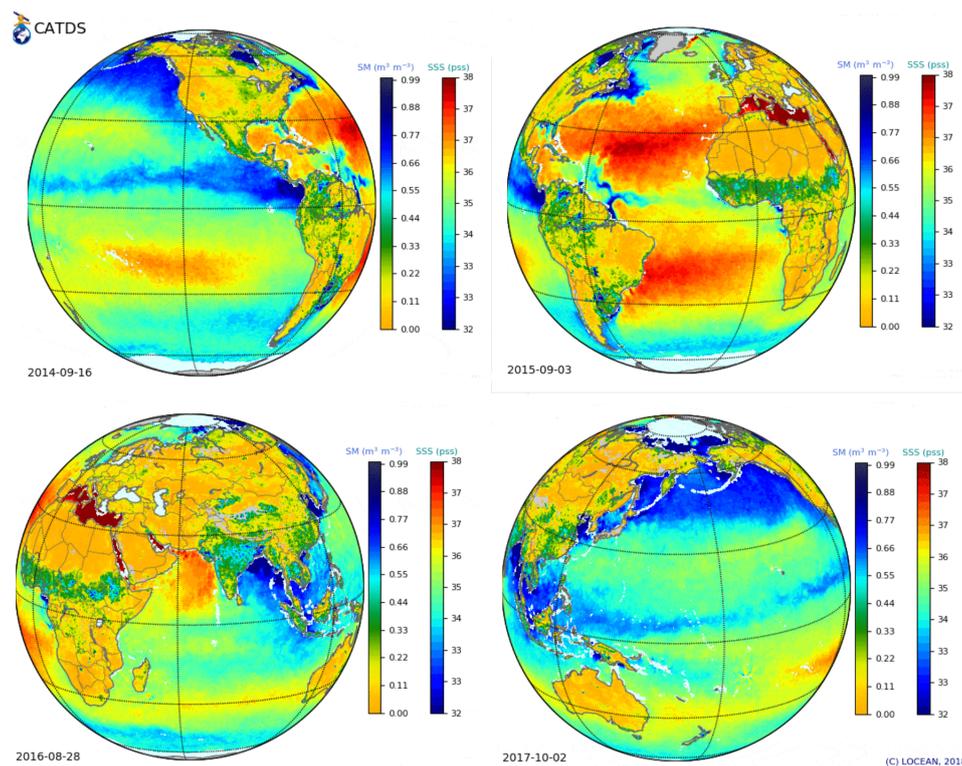


FIGURE 2 – Cartes de SM et OS de la mission SMOS. ©Dimitry Khvorostyanov, laboratoire LOCEAN. Cartes obtenues à partir des données SM de niveau 3 et produits débiaisés de Salinité des Océans du CATDS

Je rapporte quelques liens utiles concernant la mission SMOS pour la partie terre émergée :

- ESA : [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/SMOS](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/SMOS)
- CESBIO : <https://www.cesbio.cnrs.fr/la-recherche/activites/missions-spatiales/smos>
- Données L2 de l'ESA : <https://earth.esa.int/eogateway/missions/smos/data>
- Données L3 du CATDS : <https://www.catds.fr/Products/Products-access>
- Données SMOS IC de l'INRAe : <https://ib.remote-sensing.inrae.fr>

## 1.2 Principe de l'inversion des données SMOS pour la mesure de l'humidité

La spécificité de l'instrument SMOS est d'acquérir les quatre paramètres de Stokes [Kerr et al., 2020], dont sont déduites des températures de brillance à plusieurs angles d'incidence. Cette configuration offre la possibilité d'estimer les deux grandeurs que sont l'humidité superficielle du sol (SM) et l'épaisseur optique de la végétation au nadir, représentée par la lettre  $\tau_{nad}$  dans les modèles et souvent dénommée Vegetation Optical Depth (VOD) dans la littérature. L'inversion des données SMOS est basée sur la différence entre les Températures de Brillance (TB) acquises par SMOS et des TB modélisées, comme illustré sur la figure 3.

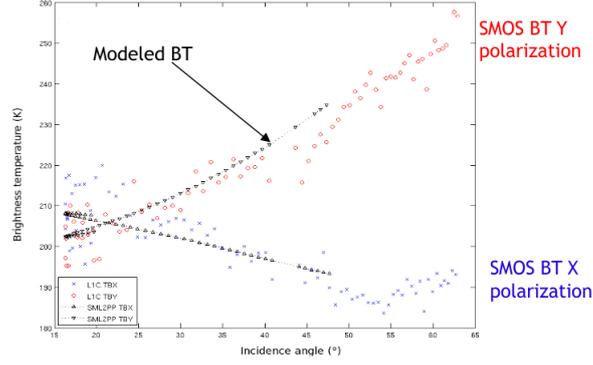


FIGURE 3 – Exemple d’acquisitions multi-angulaires de TB SMOS (en ordonnée) en fonction de l’angle d’incidence (en abscisse), pour un passage orbital et pour un point de grille. Les polarisations Y (rouge) et X (bleu) - dans le repère de l’antenne - sont utilisées pour obtenir la SM, à partir de TB modélisées (noir). ©P. Richaume, CESBIO

Le processus d’inversion cherche par itérations successives les valeurs optimales de paramètres dits libres, qui minimisent cette différence au sens du  $\chi^2$ . Dans les algorithmes de niveau 2 [A47], de niveau 3 [A26] et INRA-CESBIO (IC) [A24] [Wigner et al., 2021] sur les surfaces continentales, ces paramètres libres sont dans la grande majorité des cas SM et  $\tau$ . Des contraintes sont imposées sur des valeurs initiales de ces paramètres libres, telles que la minimisation s’opère sur une fonction dite « fonction de coût » FC, définie comme suit :

$$\begin{aligned}
 FC(Par) = & \sum_{\theta, p=\{H, V\}} \frac{(TB_{SMOS}(\theta, p) - TB_{model}(\theta, p, Par))^2}{\sigma_{TB_{SMOS}(\theta, p)}^2} \\
 & + \sum_{Par=sm, \tau_{nad}} \frac{(Par - Par_{prior})^2}{\sigma_{Par_{prior}}^2}
 \end{aligned} \tag{1}$$

où  $TB_{SMOS}(\theta, p)$  sont les températures de brillance acquises par SMOS en polarisations  $p$  (V Verticale ou H Horizontale), par angle d’incidence  $\theta$ , avec leurs incertitudes radiométriques  $\sigma_{TB_{SMOS}(\theta, p)}$ .  $TB_{model}(\theta, p, Par)$  sont les TB modélisées en considérant les valeurs des paramètres à inverser  $Par$  (paramètres libres) contraints par une valeur à priori  $Par_{prior}$  et par leurs incertitudes associées  $\sigma_{Par_{prior}}$  [A47], [Kerr et al., 2020].

Les TB modélisées  $TB_{model}(\theta, p, Par)$  dépendent d’autres paramètres fixes (non inversés) qui sont détaillés dans les prochains paragraphes.

### 1.3 TB modélisées et Transfert radiatif

La modélisation des TB s’appuie sur le modèle de transfert radiatif L-MEB (L band Microwave Emission of the Biosphere [Wigner et al., 2007]) et nous verrons plus loin qu’une alternative est en cours d’étude depuis quelques années via l’utilisation du modèle Two-Stream [Wiesmann and Mätzler, 1999]. Le modèle L-MEB considère plusieurs couches (sol, interface sol/atmosphère, rugosité de surface, végétation, atmosphère) et il est présenté dans de nombreuses publications [Wigner et al., 2007], [A49], notamment dans le cadre des algorithmes SMOS [A47], [A26], ainsi que dans une revue de synthèse regroupant les récentes avancées [A18]. Le bilan de l’émission terrestre se définit comme suit :

$$\begin{aligned}
TB_{model}(p, \theta) = & (1 - \omega(p)) \cdot (1 - \gamma(p, \theta)) \cdot T_C \cdot \gamma(p, \theta) \cdot r_G(p, \theta) \\
& + (1 - \omega(p)) \cdot (1 - \gamma(p, \theta)) \cdot T_C \\
& + (1 - r_G(p, \theta)) \cdot \gamma(p, \theta) \cdot T_G
\end{aligned} \tag{2}$$

pour laquelle  $T_G$  and  $T_C$  sont les températures effectives respectivement du sol et de la végétation,  $r_G(p, \theta)$  est la réflectivité directionnelle et polarisée du sol ( $=1-e_G(p, \theta)$ ,  $e_G(p, \theta)$  étant l'émissivité),  $\omega_p$  est l'albédo de simple diffusion de la couche de végétation supposé polarisé mais isotropique,  $\gamma(p, \theta)$  est le facteur d'atténuation polarisé et directionnel de la couche de végétation,  $p$  représente la polarisation (H pour horizontale ou V pour verticale) et  $\theta$  est l'angle d'incidence.

L'équation 2 est la somme de trois termes qui représentent respectivement : i) l'émission indirecte de la végétation, en direction du sol, réfléchié par la surface puis atténuée par la couche de végétation ; ii) émission directe de la végétation vers l'atmosphère ; iii) émission directe du sol atténuée par la couche de végétation.

La température du sol est en fait une température effective, qui intègre la contribution de plusieurs couches successives [Ulaby et al., 1986]. Une approximation pour la bande L a été développée [Holmes et al., 2006] à partir de deux températures physiques acquises à des profondeurs différentes, i.e. une à la surface et une en profondeur, pondérées par un coefficient qui dépend de l'humidité des sols.

La bande L est une fréquence protégée pour les observations astrophysiques (Comité scientifique sur l'attribution de fréquences pour la radioastronomie et les sciences spatiales IUCAF). Cependant, le lancement de SMOS a mis en valeur de nombreuses sources (RFI - Radio Frequency Interferences) qui émettent malheureusement dans la plage de fréquences utilisées pour les observations SMOS. Ces sources émettent un signal bien plus important que l'émission naturelle de la surface terrestre et il nous est impossible à l'heure actuelle de corriger ces perturbations. Il convient donc d'être très vigilant pour utiliser les données SMOS et il est essentiel de filtrer les données affectées [P13], [Oliva et al., 2016].

## 2 Comment obtenir de longues séries temporelles de SM, fiables et de qualité

Le principe général de l'inversion étant défini, nous allons à présent montrer comment plusieurs éléments clés de l'algorithme nous permettent d'aboutir à des séries de données SM-VOD de qualité.

### 2.1 Constante diélectrique du sol

Le cœur des inversions de l'humidité du sol est le modèle de constante diélectrique du sol. Il s'agit d'estimer l'émission en bande L d'un sol qui dépend de certaines de ses propriétés, parmi lesquelles sa texture (composition en argile et en sable, quantité de matière organique), sa température et sa quantité d'eau. En effet, le concept même de la mission SMOS repose sur le contraste marqué entre la constante diélectrique (partie réelle) d'un milieu sec (constante diélectrique  $\epsilon$  de  $\sim 2-5$ , [Dobson et al., 1985, Hallikainen et al., 1985]) et celle de l'eau ( $\epsilon \sim 80$ , [Klein and Swift, 1977]).

Le modèle développé par Dobson [Dobson et al., 1985], [Hallikainen et al., 1985] a longtemps été la référence en radiométrie micro-onde pour les gammes de fréquence qui nous intéressent. Nous avons montré [A48], [A35] que le modèle plus récent de Mironov [Mironov and Fomin, 2009], [Mironov et al., 2009] donnait des résultats légèrement meilleurs dans le contexte des algorithmes

de niveau 2 des données SMOS. L’extension des applications de ce modèle [Mironov et al., 2013a], [Mironov et al., 2013b], [Mironov et al., 2010], notamment en gamme de température du milieu, nous a incité à utiliser ce modèle dans les chaînes de traitement de niveau 2 (ESA), de niveau 3 (CATDS) et dans SMOS-IC [A24].

Ce modèle a été développé principalement pour des sols minéraux, ce qui limite son utilisation pour les sols riches en matière organique. Une attention particulière a donc été portée sur ces derniers et le modèle empirique de constante diélectrique de Bircher *et al.* [Bircher et al., 2016] permet dorénavant de bien prendre en compte ces sols organiques. Il est intégré dans les versions 7 et 3.36 des algorithmes de niveaux 2 et 3, et cette nouvelle configuration nous permet de mieux caractériser en SM et en VOD, les hautes latitudes. Ceci nous intéresse tout particulièrement dans le cadre de deux projets en cours : 1) les travaux de thèse de J. Ortet, que j’encadre et dont le sujet se concentre sur les régions arctiques, et qui est présenté dans le paragraphe 3.3 ; 2) le projet ESA FRM4SM (Fiducial Reference Measurements For Soil Moisture) et le post-doc de F. Gibon, qui vise à mieux estimer et caractériser l’incertitude des données SM de SMOS. Pour ce projet, une analyse sera menée courant 2022 sur les sols riches en matière organique. L’enjeu sera de s’assurer de la qualité des données *in-situ* disponibles aux hautes latitudes dont la calibration des sondes dans ces sols nécessite un étalonnage spécifique [Bircher et al., 2016]. Nous interagissons avec les équipes de l’ISMN pour obtenir des informations complémentaires relatives à ces capteurs, telles que la relation de calibration utilisée ou encore le contenu en sol organique du site. Dans le cadre de ce projet ESA, les résultats feront l’objet d’une note technique (et d’un papier) au cours du dernier trimestre 2022.

En complément de cette partie modélisation, une collaboration est en cours avec François Demontoux (IMS, Université de Bordeaux) pour effectuer des mesures de permittivité des sols. Nous utiliserons leur sonde développée pour mesurer la constante diélectrique à diverses fréquences (100 MHz-3 GHz) [P2], [P3], [P6]. Nos expériences avec ces instruments se focaliseront sur les cycles de gel et de dégel des sols. Nous pourrions ainsi caractériser l’émission en bande L lorsque le sol change d’état sous l’action des températures journalières et nocturnes [Mavrovic et al., 2021], [Mavrovic et al., 2020]. Ceci doit nous aider pour l’inversion d’une SM mais surtout du VOD [Mavrovic et al., 2020], [A2] dans les zones sujettes à de fortes variations de températures ainsi qu’à la présence de neige.

## 2.2 Effets de rugosité

La constante diélectrique permet via les équations de Fresnel de calculer l’émissivité (notée  $e$ ) et donc la réflectivité (notée  $r$  qui est égale à  $1-e$ ) à l’interface sol/air plane [Ulaby et al., 1982]. Cette réflectivité est ensuite corrigée ( $r^*$ ) pour prendre en compte les effets de rugosité de surface en s’appuyant sur le modèle suivant :

$$r_G^*(p, \theta) = (1 - Q_r) \cdot r_G(p, \theta) + Q_r \cdot r_G(p, \theta) \cdot \exp(-H_r \cdot \cos^{N_{rp}}(\theta)) \quad (3)$$

pour laquelle  $r_G(p, \theta)$  est la réflectivité d’un sol lisse ( $= 1-e$ ,  $e$  étant l’émissivité),  $p$  représente la polarisation (H ou V) et  $q$  la polarisation complémentaire (si  $p=V$  alors  $q=H$  et vice et versa),  $\theta$  est l’angle d’incidence,  $Q_r$  est une constante qui prend en compte le mélange des polarisations induit par les effets de rugosité,  $H_r$  traduit l’intensité des effets de rugosité et  $N_{rp}$  détermine les effets angulaires considérés comme polarisés. Cette approche se base sur plusieurs études développées par [Wang and Choudhury, 1981], [Wang et al., 1983], [Wigneron et al., 2001], [Escorihuela et al., 2007].

Les effets de rugosité et de topographie sont très délicats à appréhender. La rugosité augmente l'émissivité de surface et dépolarise le signal, ce qui modifie la signature angulaire du signal [A48], [A52], [A44], [A19], [A20], [A38] tel qu'illustré sur la figure 6 (bas gauche). Nous avons utilisé le site expérimental de SMOSREX [De Rosnay et al., 2006] pour étudier les effets de rugosité [A48]. Pour cela, un sol nu sans végétation a été labouré significativement, puis sa surface a évolué naturellement sous l'influence des conditions météorologiques. En parallèle, des mesures de rugosité ont été effectuées régulièrement au cours d'une période de plusieurs mois grâce à un rugosimètre de 2 mètres de long composé de 201 aiguilles verticales. Cet instrument permet d'obtenir deux informations statistiques sur l'état de la surface que sont la longueur de corrélation notée LC et l'écart type des hauteurs  $\sigma$ . Les évolutions temporelles (figure 4) des grandeurs LC et  $\sigma$ , caractéristiques de l'état de rugosité de surface, ont été croisées avec les mesures du radiomètre LEWIS [Lemaître et al., 2004] afin d'estimer l'impact de la rugosité sur les mesures de TB en bande L. La figure 5 montre la relation entre ces grandeurs de rugosité et les paramètres  $Q_r$ ,  $H_r$  et  $N_r$  utilisés dans le modèle L-MEB [A48], [A44], équation 3. Le paramètre  $Q_r$  montre une relation marquée avec l'écart type des hauteurs  $\sigma$ , indiquant une valeur  $\sim 0.1$  pour des sols plats et une valeur de 0.3 pour les sols très rugueux (figure 5a). Le paramètre  $H_r$  (figure 5b) représente l'intensité de la rugosité. Il ne présente aucune valeur distincte pour un sol plat (i.e.  $\sigma$  faible selon l'axe des abscisse), mais augmente ensuite nettement avec la rugosité (et  $\sigma$ , figure b), pour atteindre une valeur maximale comprise entre 0.8 et 1. On remarque que ces deux paramètres  $H_r$  et  $Q_r$  sont bien corrélés (figure 5h). Il semble cependant plus délicat de dégager des valeurs pour les paramètres  $N_{r,v}$  et  $N_{r,h}$ . La figure 5e nous suggère que pour des sols rugueux  $N_{r,v}$  et  $N_{r,h}$  tendent vers 0. Combiné à un  $Q_r$  fort (0.3), cela confirme la forte dépolarisation (i.e. mélange entre les polarisations H et V) engendrée par la rugosité du sol. De plus, cette rugosité crée une variabilité spatiale de SM importante. En effet, l'ensoleillement et le vent favorisent l'évaporation en haut des sillons, tandis que l'eau va s'écouler dans les creux [Völkisch et al., 2015].

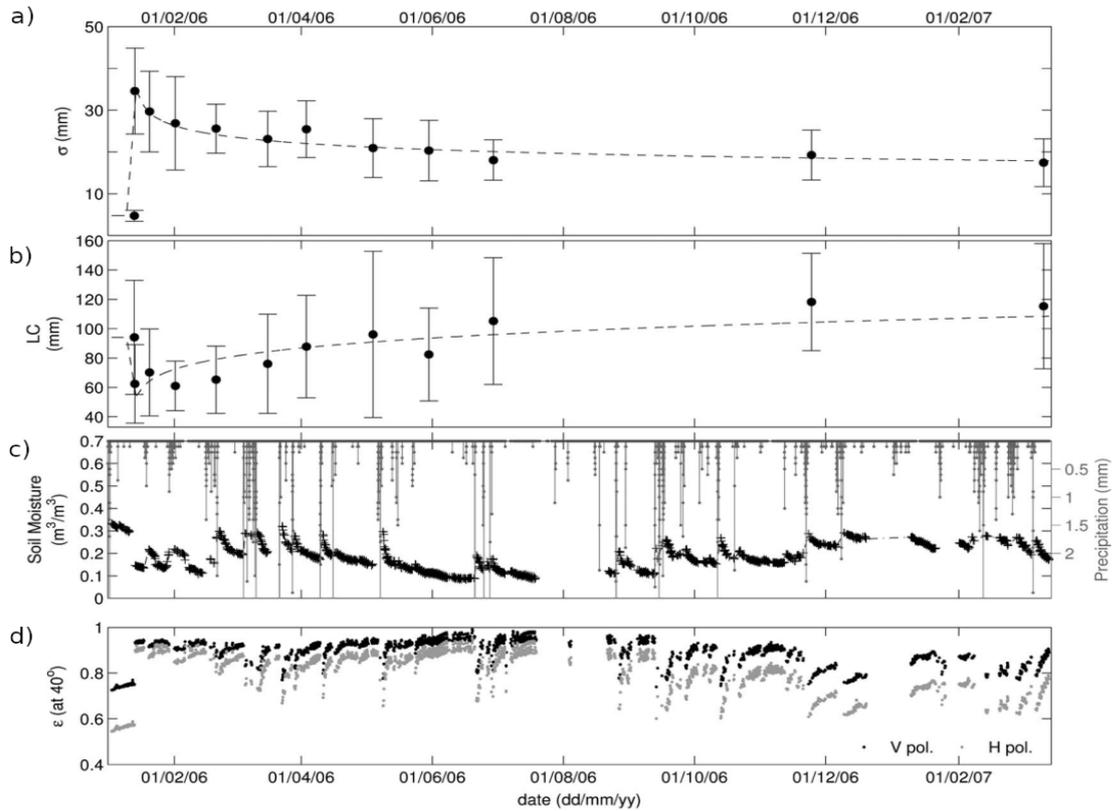


FIGURE 4 – Séries temporelles de a) écart type des hauteurs ( $\sigma$ ) des aiguilles du rugosimètre ; b) longueur de corrélation (LC) déduite des mesures du rugosimètre ; c) SM des sondes placées dans le champ et précipitations de la station météorologique d) émissivité du sol, déduite des mesures de TB du radiomètre LEWIS, aux polarisations H et V. Campagnes de terrain SMOSREX, 2006-2007, issue de [A48].

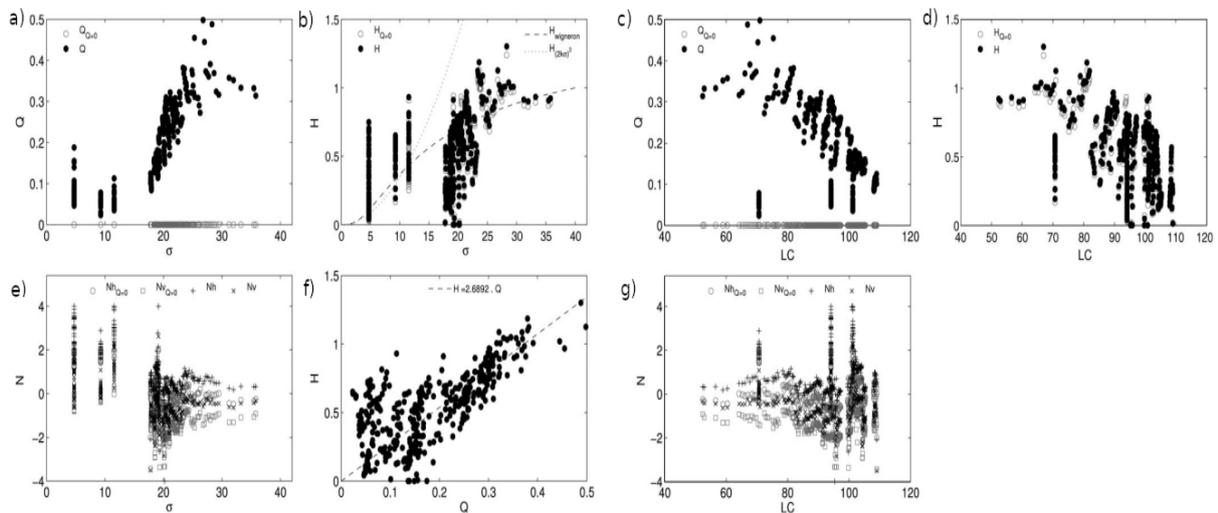


FIGURE 5 – Paramètres H, Q et N du modèle L-MEB, en fonction de mesures de rugosité de surface ( $\sigma$  et LC), du site expérimental de SMOSREX, issue de [A48].

## Effets de topographie

Ces travaux sur la rugosité de surface permettent d'envisager une modélisation et donc d'une meilleure prise en compte de ces effets sur les mesures en bande L [A44]. Une correction des effets géométriques de la surface a été proposée suite aux travaux de [Völksch et al., 2015] à partir de données du radiomètre Elbara. Ceci a été porté à plus large échelle pour étudier les effets de topographie d'un massif alpin [A28]. Cette première application a ensuite été étendue au cas spécifique du massif du Vercors dans les Alpes françaises lors du stage de F. Gibon (2014). Ce stage a montré toute la difficulté de pouvoir corriger les données SMOS des effets de rugosité à grande échelle sur des massifs montagneux. En effet, les pentes engendrent une répartition complexe de la SM et de la couche de végétation (face au soleil ou à l'ombre), qui dépolarisent fortement le signal micro-onde (figure 6). Cette dépolarisation dépend de la géométrie de chaque pente par rapport à la position du satellite et donc varie à chaque instant et pour chaque pente observée. Ce stage a montré qu'aucune correction n'était réellement applicable et que les modèles semi-empiriques utilisés rendent les inversions de la SM et du  $\tau_{nad}$  délicates à interpréter dans ces régions. Un masque a été créé pour identifier les zones de forte topographie pour lesquelles la sensibilité des données SMOS et du modèle n'est pas suffisante pour permettre une inversion significative [A55]. Ces pixels sont pour l'heure exclus des zones étudiées.

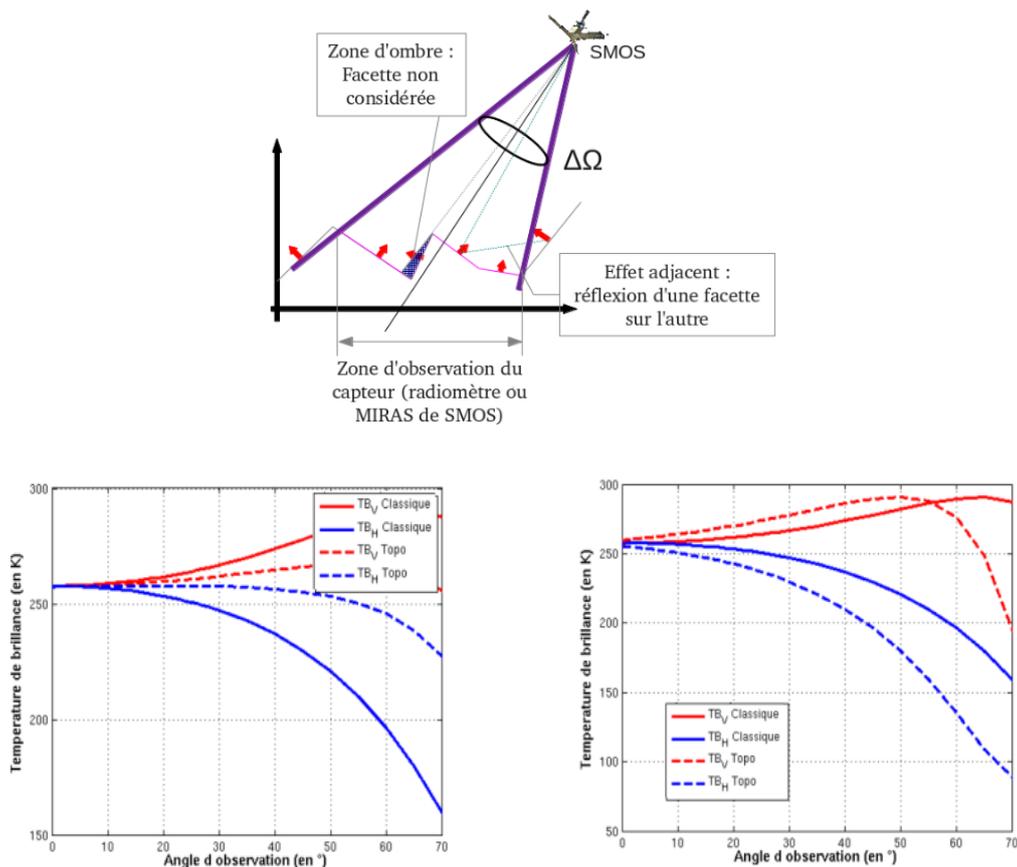


FIGURE 6 – TB modélisées d'une surface inclinée, avec le modèle L-Meb dans sa configuration habituelle (traits pleins) et après correction des effets de topographie (pointillés), selon deux orientations différentes. Ces figures sont issues du rapport de stage de F. Gibon (figures 4.10 et 4.11).

## 2.3 Couche de végétation

La couche de végétation du modèle L-MEB est définie par le modèle "Tau-Omega", qui a été proposé par Mo *et al.* [Mo et al., 1982] puis développé par plusieurs études [Wigneron et al., 2007]. Dans l'équation 2, les deux termes  $\omega$  et  $\gamma$  définissent la contribution du couvert végétal. Des travaux [Rahmoune et al., 2013], [A21] ont permis de définir le terme de l'albédo de simple diffusion  $\omega$  [Kurum, 2013], estimé entre 0.06 et 0.08 pour les forêts denses et 0 pour les couverts végétaux moins denses (type savane, surfaces agricoles etc...) [A18], [A47].

Le facteur d'atténuation  $\gamma$  dépend de l'angle d'incidence (équation 4) tel que :

$$\gamma_{(p,\theta)} = \exp(\tau_p(\theta))/\cos\theta \quad (4)$$

$\tau_p(\theta)$  est exprimé comme une fonction du VOD au nadir  $\tau_{nad}$  comme :

$$\tau_p(\theta) = \tau_{nad} \cdot (\sin^2(\theta) \cdot tt_p + \cos^2(\theta)) \quad (5)$$

pour laquelle  $tt_V$  et  $tt_H$  sont des paramètres qui rendent compte d'effets directionnels et polarisés, pouvant être différents suivant les structures plus ou moins anisotropes de la végétation. Par défaut, on émet l'hypothèse que  $\tau_p(\theta)$  ne dépend ni de la direction d'observation ni de la polarisation, ce qui implique que  $tt_H=tt_V=1$  et que  $\tau_p(\theta)$  dans l'équation 5 devient égal à  $\tau_{nad}$ . Ce  $\tau_{nad}$  est également appelé épaisseur optique de la végétation, et on le retrouve dans la littérature sous l'appellation Vegetation Optical Depth ou VOD.

### Relation entre le $\tau_{nad}$ et les indices optiques de végétation

Les premières études sur le  $\tau_{nad}$  (ou VOD) ont porté sur le lien possible avec les indices optiques classiques utilisés comme proxys pour la végétation. L'intérêt alors, était de pouvoir initialiser la valeur du  $\tau_{nad}$  pour la première itération du processus d'inversion [Saleh et al., 2006], [Wigneron et al., 2007]. Celle couramment utilisée relie le  $\tau_{nad}$  avec le LAI (Leaf Area Index) comme suit :

$$\tau_{nad} = b' \cdot LAI + b'' \quad (6)$$

ou  $b'$  and  $b''$  sont des paramètres empiriques qui dépendent du type de végétation. L'information LAI présente l'avantage d'être globale, ce qui est compatible avec la couverture spatiale des données SMOS [A47],[Kerr et al., 2020].

Il existe une relation similaire avec le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) indice obtenu également à partir de mesures optiques. On notera que la mission satellite SMAP (*Soil Moisture Active and Passive mission*) de la NASA utilise les relations suivantes ([O'Neill et al., 2012]) :

$$\tau_{nad} = b \cdot VWC \quad (b \text{ default value} = 0.12) \quad (7)$$

avec VWC (Vegetation Water Content, en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) et

$$VWC = (1.9134 \times NDVI^2 - 0.3215 \times NDVI) + Stemfactor \times \frac{NDVI_{ref} - 0.1}{1 - 0.1} \quad (8)$$

avec Stemfactor un paramètre relié à la hauteur moyenne de la végétation (par classe) et au ratio entre la surface de l'aubier (sapwood) et la surface foliaire ([O'Neill et al., 2012]).

**Validité de la relation linéaire entre  $\tau_{nad}$  et le LAI**

Dès les premières données SMOS disponibles, la relation (équation 6) entre les indices optiques et le  $\tau$  SMOS a pu être évaluée à l'échelle globale [A41], [A32]. Ces travaux ont montré que l'hypothèse d'une relation linéaire entre le LAI et le VOD n'était pas vérifiée. En effet, les indices optiques traduisent l'état vert de la végétation, qui croît quand celle-ci se développe et sature à partir d'un certain niveau de couverture. Arrivées à sénescence, les feuilles stoppent leur activité de synthèse de la chlorophylle et perdent leur couleur verte. Le VOD en bande L est quant à lui sensible i) au contenu en eau de la végétation, ii) à la structure de la végétation c'est-à-dire la quantité de biomasse, et accessoirement à l'orientation des branches [Konings et al., 2019], [Konings et al., 2021], et ces deux contributions influencent la mesure même lorsque les feuilles stoppent leur activité photosynthétique.

Un décalage temporel est ainsi observé entre les cycles saisonniers des indices optiques et du VOD. Sur les cultures agricoles, les indices optiques présentent un maximum à la fin du printemps/début de l'été pour ensuite diminuer, alors que le VOD présente un maximum à la fin de l'été/début de l'automne [Patton and Hornbuckle, 2012], [A45], [Chaparro et al., 2018], [Togliatti et al., 2019], [Wang et al., 2020]. Comme indiqué sur la figure 7, nous avons également constaté ce décalage au cours du stage de M. Barrée (2020), dont les travaux ont porté sur l'analyse des données du radiomètre LEWIS (cf. paragraphe 2.5 pour plus de détails). Cette figure 7 est extraite du papier récemment publié sur le sujet [A6]. L'approche utilisant le NDVI (équation 8) a également été testée au cours de ce stage, mais les résultats obtenus en SM et VOD sont très sensibles à la définition du paramètre stemfactor (équation 8). Considérant les résultats obtenus comme peu satisfaisants, il ne nous a pas semblé pertinent de développer cette approche.

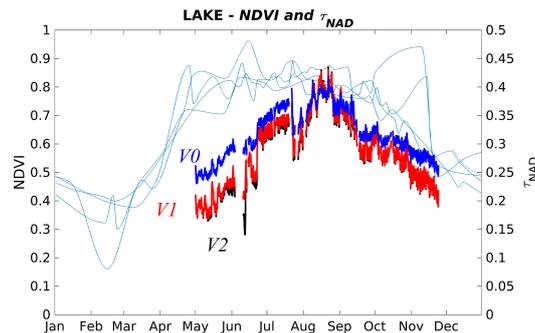


FIGURE 7 – Comparaison entre le NDVI et plusieurs VOD obtenues à partir du radiomètre LEWIS, sur le site expérimental situé dans les Alpes. Figure issue du stage de M. Barrée (2020) et du papier qui en est tiré [A6].

Dans l'algorithme d'inversion de SMOS, la relation LAI- $\tau_{nad}$  (équation 6) qui sert comme connaissance *a priori* du  $\tau_{nad}$  est finalement peu utilisée. Dans la grande majorité des cas, l'algorithme utilise les  $\tau_{nad}$  inversés lors des jours précédents, ainsi que leurs incertitudes, comme valeurs *a priori* soit  $\tau_{nad,prior}$  et dans l'équation 1.

### Effet d'atténuation

Une contribution majeure de la couche de végétation est l'atténuation de l'émission de la surface. A titre d'exemple, les travaux d'E. Bousquet [A4] ont porté sur l'erreur associée à un couple {SM- VOD} dans différents cas de couverts végétaux et de fraction d'eau de surface. A partir d'une modélisation de scènes simples telles que représentées sur la figure 10, l'étude [A4] a permis d'évaluer l'erreur associée aux SM et VOD dans le cas d'inondations ou de fractions d'eau dynamiques (qui évoluent avec la saison et les années) en fonction de la densité du couvert végétal. Pour les trois cas d'études proposés, qui diffèrent par leur couverture végétale (cf. figure

9), l'analyse montre que les erreurs d'estimation de SM et de VOD augmentent avec la fraction d'eau, mais que cette erreur est très atténuée en cas de forêt dense.

Il reste beaucoup de travaux à mener concernant la validation de données SM en forêt, et nous pourrons bientôt bénéficier des sondes d'humidité installées depuis l'été 2021 sur le site expérimental de Guyane (TropiSAR, [El Idrissi et al., 2021]) développé pour la mission spatiale « biomass » de l'ESA. Ces mesures ainsi que celles issues d'un radiomètre en bande L vont nous aider dans la compréhension du signal en bande L dans le contexte de forêts tropicales et feront l'objet d'une étude spécifique de la thèse de C. Salazar-Neira qui a démarré en octobre 2021.

Cependant, le  $\tau_{nad}$  est de plus en plus étudié [A10], [A12], [A16], [A15], [A13] et il est maintenant à considérer au même titre que le SM. Nous verrons dans les sections 2.4 et 3.1 le développement de l'utilisation de ce  $\tau_{nad}$ .

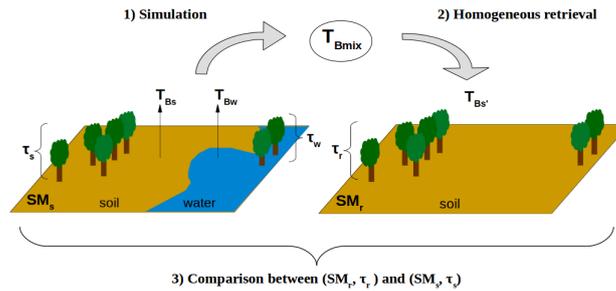


FIGURE 8 – Exercice de modélisation pour estimer l'erreur en SM et VOD due à la mauvaise prise en compte de la dynamique spatiale des étendues d'eau. Issue des travaux d'E. Bousquet et de son papier [A4].



FIGURE 9 – Illustration de trois cas de zones inondées en Amazonie, qui diffèrent par la densité du couvert végétal, tirée de [A4].

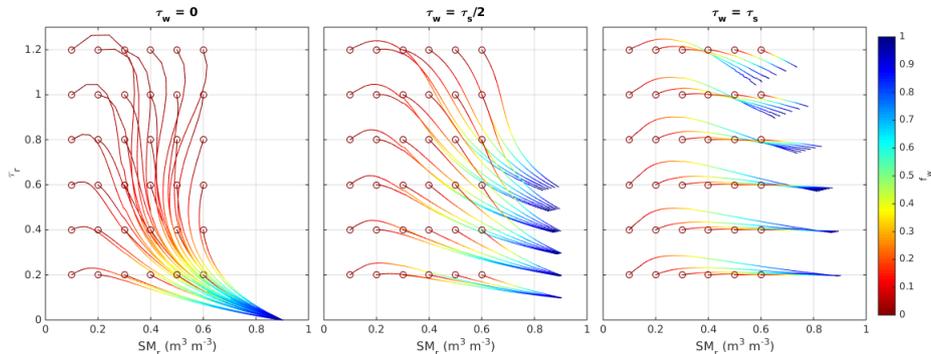


FIGURE 10 – SM et VOD inversés en fonction de la fraction d'eau  $f_w$  (code couleur, correspondant aux lignes de trajectoires). L'erreur en SM et VOD s'évalue en comparant le point de départ (SM, VOD) (cercles rouges) et celui d'arrivée le long des lignes, tirée des travaux d'E. Bousquet et de son article [A4].

## 2.4 Algorithme de niveau 3

Les paragraphes précédents ont permis d'aborder la modélisation de l'algorithme d'inversion qui est commune aux produits SMOS existants, i.e. les niveaux 2, 3 et IC. Cependant, le niveau 3 présente en plus une particularité que nous abordons ici. Il a été montré que l'inversion des deux paramètres SM et  $\tau_{nad}$  à partir des mesures SMOS dépend fortement des conditions initiales, conditions définies pour démarrer la minimisation de la fonction de coût (équation 1). Le niveau 2 [A47] utilise un concept proposé dès la proposition de la mission SMOS (en 1997) puis publié [Wigneron et al., 2000] et qui consiste à utiliser la valeur de  $\tau$  obtenue lors de jours précédents. L'algorithme de niveau 3 développe ce concept et propose une inversion multi-orbites [A26], [TN4], pour laquelle trois orbites consécutives sont inversées simultanément, ce qui a pour effet d'augmenter le nombre de degrés de liberté, soit le nombre de TB utilisées pour l'inversion moins le nombre de paramètres inversés. Un nœud de la grille est vu par SMOS tous les deux/quatre jours, ce qui signifie que trois orbites successives couvrent une fenêtre temporelle de sept jours. On peut faire l'hypothèse que le  $\tau_{nad}$  ne doit pas changer radicalement au cours de cette période et donc appliquer une contrainte sur les trois  $\tau_{nad}$  inversés afin d'assurer une cohérence entre ces trois valeurs et éviter une variabilité inter journalière trop forte [TN4], [P18], [A26]. Une première approche a permis de déterminer le concept [TN4], [A26], mais la comparaison avec des données SM de sites *in-situ* a soulevé un problème d'instabilité des inversions, qui aboutissait à des valeurs de SM aberrantes, avec pour conséquence des performances du niveau 3 peu satisfaisantes [A11]. Les concepts de multi-orbites et de contrainte sur le  $\tau_{nad}$  sur sept jours ont été conservés mais nous avons revu la définition même de cette contrainte [TN8], [TN5], [TN7]. Cette nouvelle version se base sur le formalisme décrit par l'équation 9, basé sur une fonction de coût similaire à celle du niveau 2 auquel s'ajoute une contrainte de régularisation  $R(P)$ , tel que :

$$CF(P) = (TB_M - TB_F)^t \cdot COV_{TB_M}^{-1} \cdot (TB_M - TB_F) + \sum_P (P - P_0)^t \cdot COV_{P_0}^{-1} \cdot (P - P_0) + R(P) \quad (9)$$

pour laquelle  $CF(P)$  est la Fonction de Coût, TB sont les températures de brillance (modélisées et observées), P représente les paramètres libres (i.e. SM et  $\tau_{nad}$  pour la majorité des cas) et  $P_0$  leur valeurs initiales, l'indice M se rapporte aux données mesurées et F aux données simulées, et enfin COV est la matrice de covariance.

$COV_{TB}$  est une matrice diagonale dont les coefficients sont la variance des incertitudes radiométriques des  $TB_{SMOS}$ .  $COV_{P_0}$  est la matrice de covariance portant sur les incertitudes des valeurs *a priori*  $P_0$ . Comme le niveau 3 considère trois orbites consécutives, le nombre de paramètres libres peut atteindre la valeur de six (trois SM et trois  $\tau_{nad}$ ). En conséquence  $COV_{P_0}$  (équation 11) est la matrice diagonale de la variance des incertitudes associées aux triplets de valeurs *a priori*  $sm_0$  et  $\tau_{nad,0}$  (équation 11). Initialement, les trois  $\tau_{nad}$  étaient reliés par une fonction de corrélation telle que définie dans [A26] qui implique des termes non diagonaux dans la matrice  $COV_P$  (équation 11). Les évolutions mentionnées ici concernent les équations 2 et 3 du papier de référence [A26]. La contrainte temporelle sur le VOD s'écrit dorénavant comme suit :

Dans l'équation 9,  $P - P_0$  devient :

$$P - P_0 = \begin{bmatrix} SM_1 - sm_0 \\ SM_2 - sm_0 \\ SM_3 - sm_0 \\ \tau_{nad,1} - \tau_0 \\ \tau_{nad,2} - \tau_0 \\ \tau_{nad,3} - \tau_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

et

$$COV_P = \begin{bmatrix} \sigma_{sm}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{sm}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{sm}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\tau_{nad}}^2 & R & R \\ 0 & 0 & 0 & R & \sigma_{\tau_{nad}}^2 & R \\ 0 & 0 & 0 & R & R & \sigma_{\tau_{nad}}^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

où  $sm_0$  est la valeur initiale de SM et  $\tau_{nad,0}$  est la valeur initiale de tau,  $\sigma_{sm}$  et  $\sigma_{\tau_{nad}}$  les incertitudes respectives, qui sont fixées. Les valeurs de ces paramètres sont données dans les documents suivant [Kerr et al., 2020] [A26] et [TN4].

La nouveauté vient donc de la modification du terme  $R$  de régularisation dans l'équation 11 qui devient :

$$R = \frac{var(\tau_{nad,1}, \tau_{nad,2}, \tau_{nad,3})}{vartau_{ref}} \quad (12)$$

pour laquelle  $vartau_{ref}$  est une constante de contrôle de la contrainte sur la variabilité temporelle tolérée sur les valeurs inversées des  $\tau_{nad}$ .

$$var(\tau_{nad,1}, \tau_{nad,2}, \tau_{nad,3}) = \frac{1}{N_0 - 1} \cdot \sum_{orb=1,2,3} (\tau_{nad,orb} - \overline{\tau_{nad,1-2-3}})^2 \quad (13)$$

où  $\overline{\tau_{nad,1-2-3}}$  est la moyenne des trois  $\tau_{nad}$ .  $N_0$  est le nombre d'orbites utilisées pour l'inversion qui est compris entre 1 et 3. Cette modification a été intégrée dans la version v336 du processeur de niveau 3 qui est devenue la référence depuis novembre 2021. Après une période conséquente de développement, puis d'interactions avec les équipes industrielles (rédaction des documents définissant les spécifications, échanges sur des points spécifiques), les données de niveau 3 ont pu être produites via la campagne de retraitement n°7 (RE07). Les premiers résultats sont présentés dans les figures suivantes 11, 12 et 13 qui nous indiquent une bonne cohérence avec les données de niveau 2 version 700, version de référence.

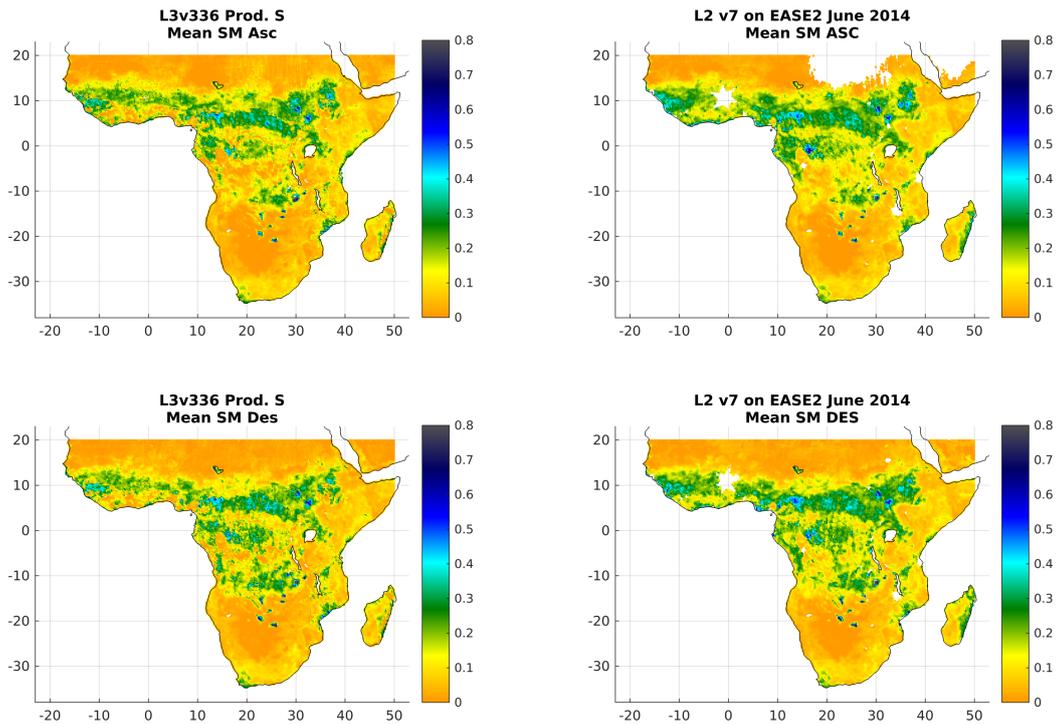


FIGURE 11 – Cartes spatiales de SM des données de niveau 3 version 336, et de niveau 2 version 7, pour l’Afrique, phase ascendante en haut, phase descendante en bas. Moyenne mensuelle du mois de juin 2013.

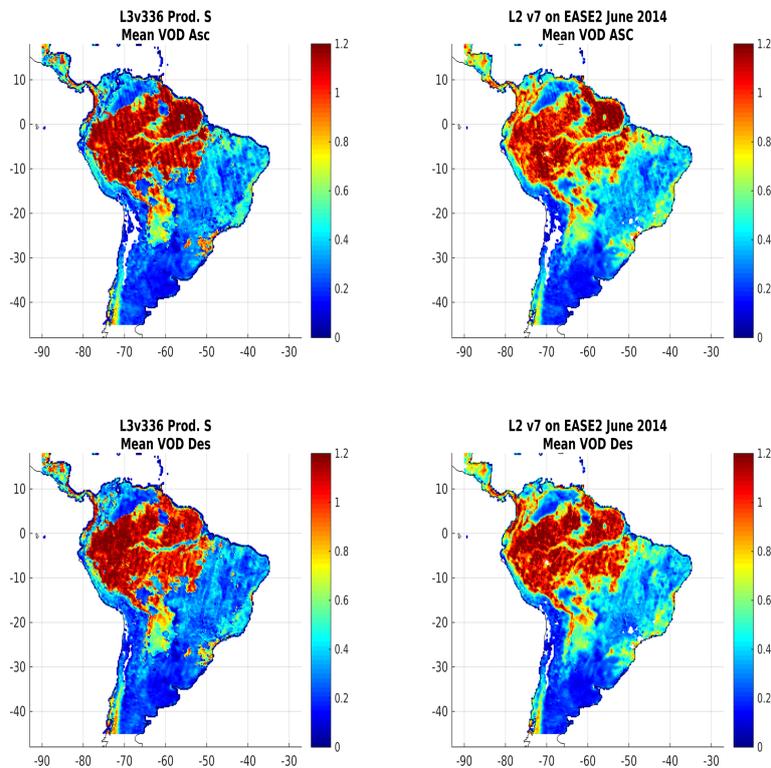


FIGURE 12 – Cartes spatiales de  $\tau_{nad}$  (= VOD) des données de niveau 3 version 336, et de niveau 2 de version 7, pour l’Amérique du sud, phase ascendante en haut, phase descendante en bas. Moyenne mensuelle du mois de juin 2013.

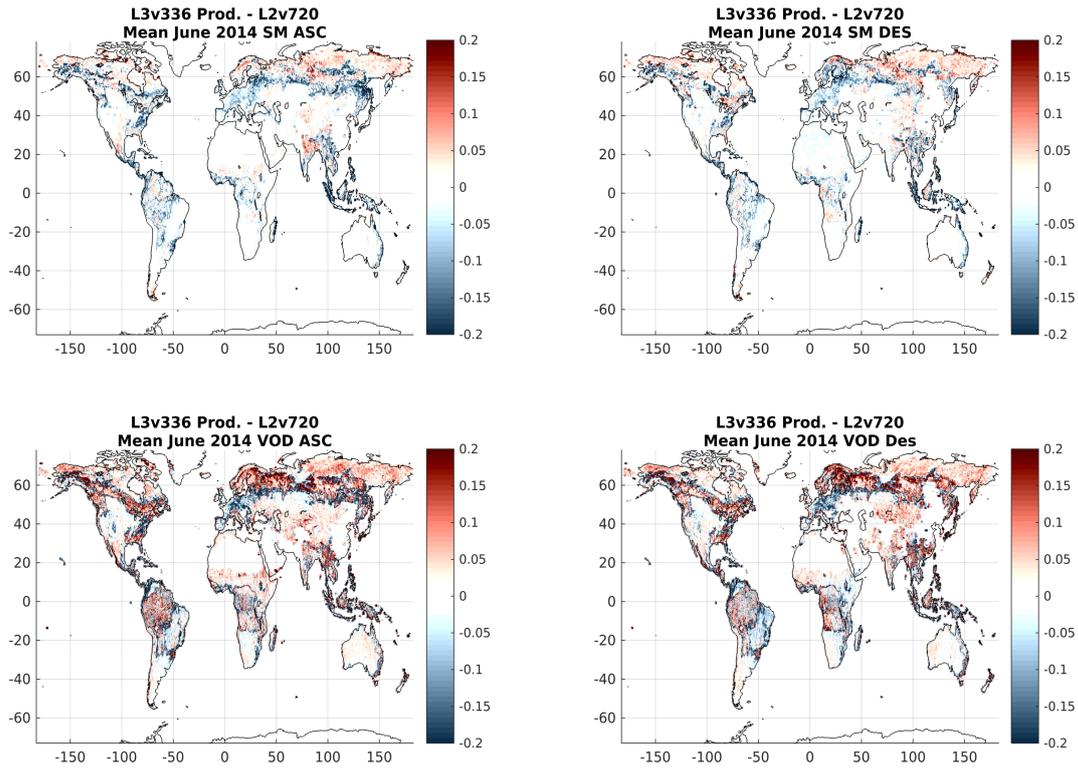


FIGURE 13 – Cartes spatiales des différences de SM (figures du haut) et de  $\tau_{nad}$  (ou VOD, figures du bas) telles que niveau 3 moins le niveau 2 ; moyenne mensuelle du mois de juin 2013.

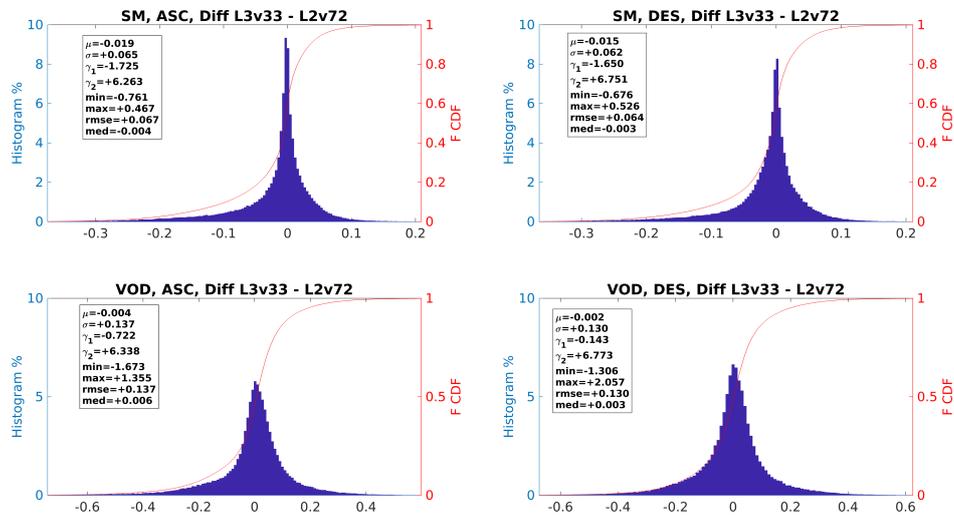


FIGURE 14 – Histogramme des différences en SM et VOD (cartes figure 13), entre les versions 336 du niveau 3 et version 7 du niveau 2.

Nous pouvons noter des différences entre les deux versions (niveau 2 version 7 et niveau 3 version 336) variables suivant les régions. A l'échelle globale, les SM et  $\tau_{nad}$  (VOD) sont cependant très proches (figure 14) ce qui conforte la nouvelle définition de la contrainte sur le  $\tau_{nad}$  (équations 11 et 12). La validation de ces données passe par une évaluation avec les données SM *in-situ*. Pour illustrer l'exercice, un exemple présente les séries temporelles de SM et de VOD pour le site de Walnut Gulch aux Etats-Unis (figure 15). On identifie clairement le problème évoqué à propos de l'ancienne version du niveau 3 (série noire avec les étoiles) qui affiche des valeurs de

SM très éloignées du niveau 2 et des données *in-situ*. Pendant la phase de développement de cette correction, plusieurs tests ont été effectués en jouant sur la valeur du paramètre  $var\tau_{ref}$  (voir équation 12) et ainsi déterminer la configuration la plus performante (voir les notes techniques associées [TN8], [TN5], [TN7]).

Ces nouvelles données de niveau 3 ont été évaluées avec les données *in-situ* dans le cadre du projet ESA FRM4SM et des travaux de F. Gibon (contrat post doctoral). En considérant tous les sites du réseau ISMN de mesures *in-situ* et plus spécifiquement les sondes comprises entre 0 et 10 cm de profondeur, nous constatons que les performances en SM sont très intéressantes (figure 16). On note également le très net gain apporté par la nouvelle version du niveau 3 par rapport à la version précédente.

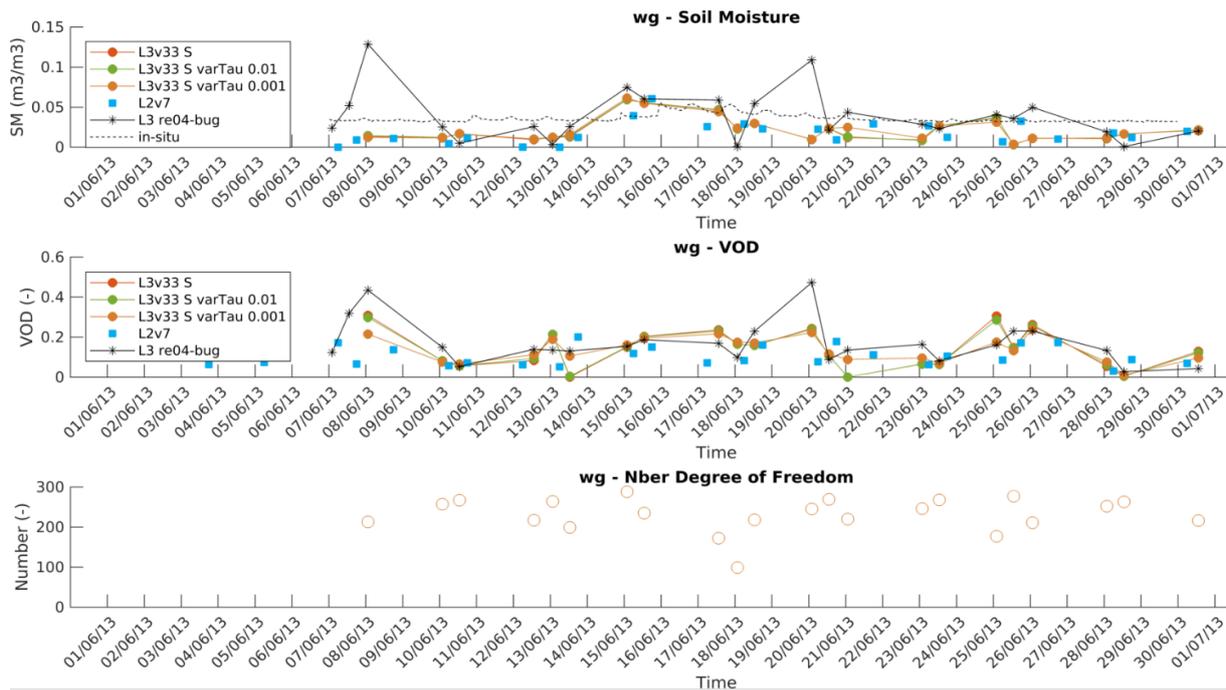


FIGURE 15 – Séries temporelles de SM (figure du haut), de VOD (figure du milieu) et le nombre de degrés de liberté\* (figure du bas), pour le pixel relatif au site de Walnut Gulch WG (Etats-Unis) en juin 2013. Plusieurs versions des données SMOS sont affichées : niveau 2 version 7, niveau 3 version 336 (plusieurs versions) et la version du niveau 3 non corrigée (L3 re04-bug). Les données *in-situ* du site sont en pointillé.

\* nombre de degrés de liberté = nombre de températures de brillance moins le nombre de variables inversées (souvent égal à six, soit trois SM et trois VOD)

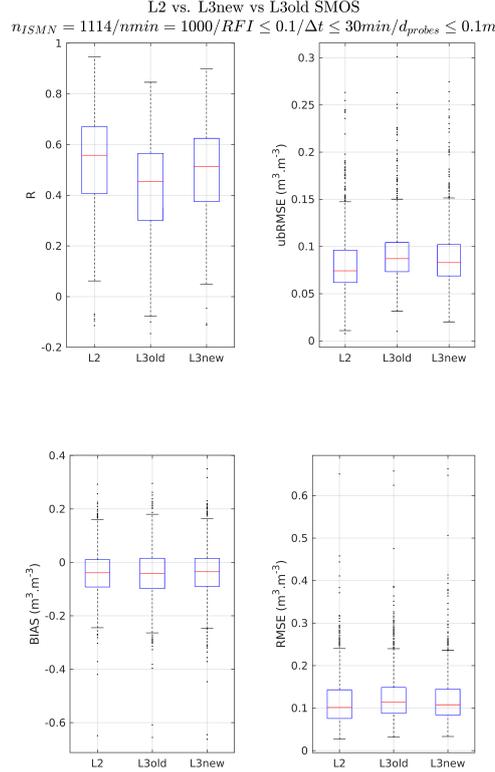


FIGURE 16 – Statistiques de comparaison entre les données SM de SMOS de niveau 2 et niveau 3 (ancienne version "L3old" et la nouvelle "L3new") et les données de terrain de l'ISMN. Les statistiques calculées sont le coefficient de corrélation de Pearson (R), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE Root Mean Square Error), la RMSE non biaisée (ubRMSE) et le biais. Pour chaque statistique, l'ensemble des résultats est représenté sous forme de boîte à moustaches (valeur médiane, 1er et 3eme quantile pour le rectangle). Travail de F. Gibon (contrat post doctoral sur le projet ESA FRM4SM).

Le  $\tau_{nad}$  est plus difficile à évaluer car il ne s'agit pas d'une grandeur géophysique mais d'une quantité radiative et à ce titre il n'existe pas de vérité terrain à ce sujet. Nous pouvons cependant utiliser les estimations de quantités de biomasse (Above Ground Biomass) pour nous guider dans cette validation, même si la relation entre ces deux quantités n'est pas totalement directe (cf. partie 3.1). Les  $\tau_{nad}$  issus des dernières versions du niveau 2 (version 7) et niveau 3 (version 336) sont comparés à la carte de Biomasse du projet GlobBiomass [Santoro et al., 2021] et présentés sur la figure 17. Les données SMOS-IC version 1 sont également présentées pour compléter la comparaison. La carte d'AGB est faite à partir d'observations acquises en 2010, mais nous avons considéré l'année 2011 pour SMOS, 2010 étant trop perturbée par des RFI. Nous pouvons cependant constater que les données du nouveau niveau 3 sont très comparables au niveau 2 (figure 18), ce qui soutient la nouvelle définition de la contrainte sur le  $\tau_{nad}$  (équations 11 et 12).

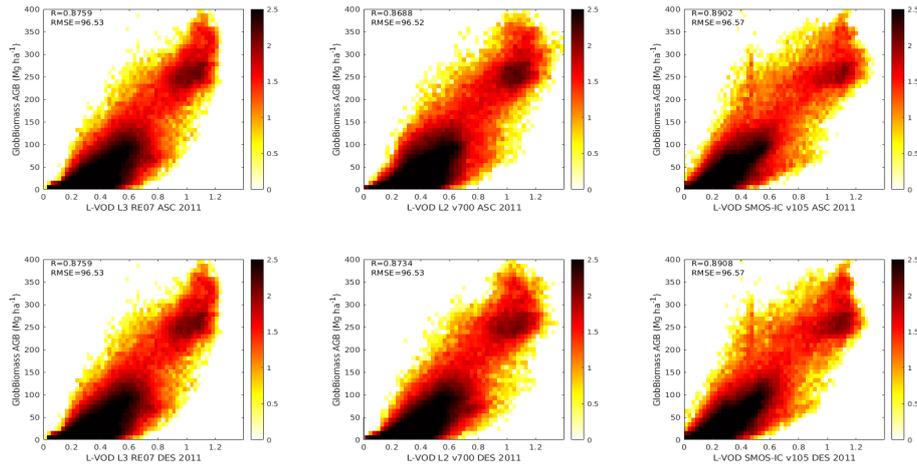


FIGURE 17 – Moyenne annuelle de SMOS  $\tau_{nad}$ (VOD) pour juin 2011, en fonction de la quantité de biomasse issue du projet GlobBiomass. Les orbites ascendantes (descendantes) sont sur la ligne du haut (bas). La colonne de gauche est relative aux données SMOS de niveau 3 (version 336 de la campagne de retraitement n°7), celle du milieu représente le niveau 2 (version 7) et celle de droite est le produit SMOS-IC. Issue des travaux d'E. Bousquet, 2021.

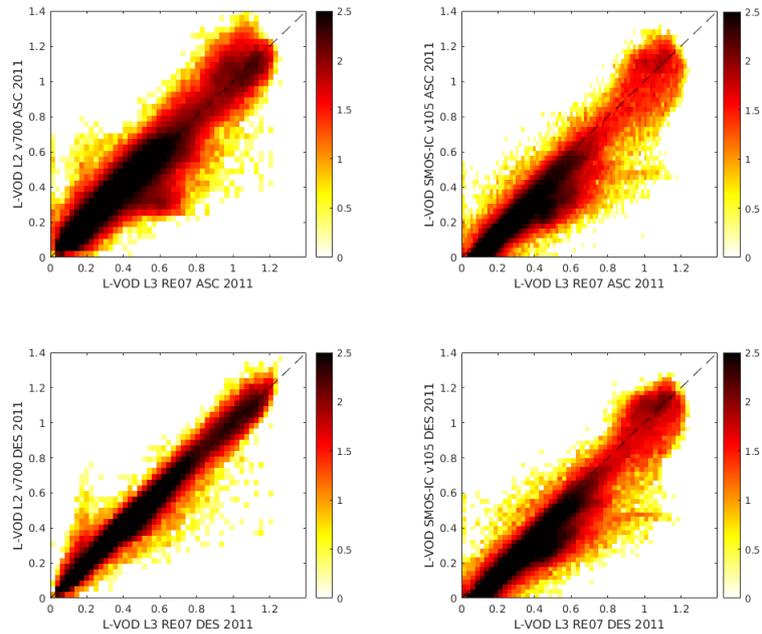


FIGURE 18 – Comparaison entre les  $\tau_{nad}$  SMOS (VOD), le nouveau  $\tau_{nad}$  de niveau 3 étant reporté sur tous les axes des abscisses. Les axes des ordonnées sont représentés par : i) colonne de gauche, le  $\tau_{nad}$  de niveau 2 (version 7) ii) colonne de droite, SMOS-IC version 1. Les orbites ascendantes (06h du matin) sur la colonne du haut et les orbites descendantes (18h) sur la colonne du bas. Travaux d'E. Bousquet, 2021.

### 2.4.1 Données Auxiliaires

L'inversion des données SMOS pour obtenir des estimations de SM et de VOD repose également sur la qualité des données auxiliaires utilisées. En effet, l'émission micro-ondes de la surface dépend de plusieurs propriétés des milieux parmi lesquels la composition du sol en argile et en sable (texture), la densité de ce sol, les températures (sol et végétation) et contenu en eau du couvert végétal. L'influence de ces informations sur le signal micro-onde peut être conséquente et il est donc essentiel de disposer de jeux de données les plus précis possible. Ces informations sont cependant difficiles à obtenir à l'échelle globale d'autant plus que les jeux de données évoluent depuis le début de la mission. Ainsi, de nombreuses évolutions ont été incorporés aux chaînes de traitement. Pour intégrer ces informations, des études préalables évaluent l'impact de ces données sur les inversions de SM et de VOD. J'ai, par exemple, travaillé sur l'utilisation des données IMS sur l'estimation de la couverture nivale spatiale quotidienne [ims, 2008], [Helfrich et al., 2007], [Ramsay, 1998] qui ont remplacé les données ECMWF dans la chaîne opérationnelle de l'ESA à la suite de notre étude [TN9].

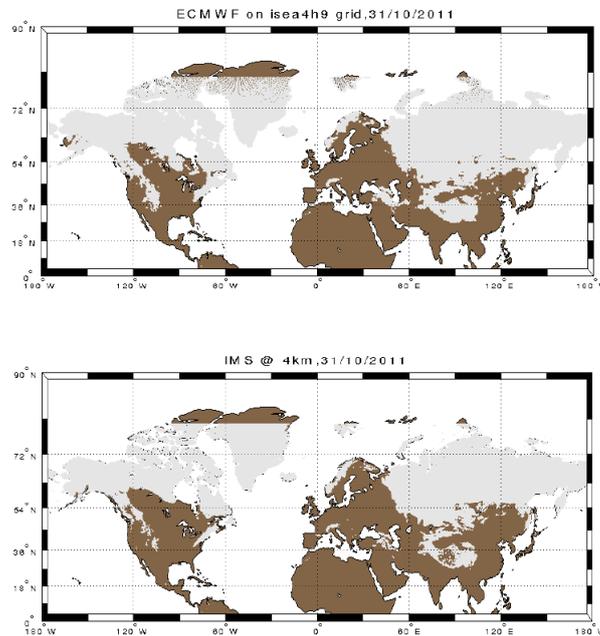


FIGURE 19 – Etendues spatiales du couvert nivale selon la base de données IMS (figure du haut) et ECMWF (figure du bas), pour le 31 octobre 2011, issue de la note technique [TN9].

## 2.5 Algorithmes alternatifs

Depuis le début de la mission, des options alternatives aux algorithmes officiels existent [Kerr et al., 2020], [A47], [A26]. Ces méthodes sont plus ou moins avancées mais elles sont à considérer pour obtenir une SM de qualité. Je cite ci-dessous quelques exemples des approches possibles qui ont été testées lors de diverses études.

### Homogénéité spatiale

Au cours de la phase précédant le lancement du satellite, des outils en langage Matlab ont été développés pour modéliser une température de brillance telle que SMOS allait la mesurer, basés

sur de nombreux travaux sur l'émission en bande L [Wigneron et al., 1995], [Wigneron et al., 2000], [Wigneron et al., 2001]. Les modèles de transfert radiatif et une chaîne de traitement simplifiée ont ainsi été utilisés en considérant la surface des pixels homogènes. La notion d'homogénéité spatiale signifie qu'une seule classe de couverture du sol couvre le champ de vue de l'instrument et donc un seul jeu de paramètres est utilisé pour le transfert radiatif par nœud de grille [A18]. Cet exercice fut très bénéfique pour préparer et valider les chaînes de traitements, qui ont pu être opérationnelles dès le lancement du satellite.

Ce concept a été développé pour le projet SMOS-IC porté par J.-P. Wigneron (INRAE Bordeaux) [A23] [Wigneron et al., 2021], qui démarra en collaboration entre l'INRAE et le CESBIO, dans le cadre de la thèse de R. Fernandez-Moran [A24], [A23]. Avec mon collègue A. Mahmoodi, j'ai pris part au développement de cette approche. Le principe général de l'inversion reste identique à celui des algorithmes de l'ESA et du CATDS, abordé au cours des paragraphes précédents. Cependant, SMOS-IC simplifie l'inversion en ne considérant plus les notions d'hétérogénéité spatiale et de radiométrie, et en utilisant en entrée les TB de niveau 3 (températures de brillance en polarisations H et V). De plus, les paramètres des modèles ont été optimisés en utilisant les données SM du réseau ISMN [A24], [A23]. Cette approche donne de très bons résultats [A11] et nous la conservons pour nos exercices de validation et de modélisation [A8], [A4].

### Inversion simultanée de deux $\tau_{nad}$

Dans les évolutions possibles des algorithmes de niveau 2, une option souvent mentionnée est de considérer 3 paramètres libres : une SM caractérisant tout le champ de vue, un  $\tau_{nad}$  pour la partie végétation basse/éparse et un  $\tau_{nad}$  pour les couches de végétation plus denses de type forêts. La diffusion dans le couvert végétal est une composante majeure de l'émission micro-onde et il semble important de distinguer les fonctionnements des forêts denses, des couverts végétaux moins denses.

Nous avons tiré profit du stage de M. Barré sur l'utilisation des données du radiomètre LEWIS pour explorer cette piste. Le radiomètre LEWIS (voir annexe A) observait des scènes suffisamment larges (300-400 mètres de dimension) pour intégrer dans son champ de vue des couverts agricoles mais également une zone de forêt dense. Le stage de M. Barré a permis de tester plusieurs configurations d'inversion, dont on présente ci-dessous un exemple pour la scène identifiée "lake". La zone observée par le radiomètre LEWIS (figure 20) est composée de champs agricoles (55%), de forêts (38%), d'un lac (2%) et de constructions urbaines (5%). La figure 21 issue de son papier publié [A6], présente des séries temporelles de SM et de  $\tau_{nad}$  pour un site de l'expérience. Trois configurations d'inversion ont été testées et pour ces trois cas le SM caractérise toujours la totalité de la scène observée. Dans un premier cas, le  $\tau_{nad}$  est identique pour toutes les classes de végétation. Il s'agit du retrieval 0 sur la figure 21. Dans notre second cas (retrieval 1 sur la figure 21), deux  $\tau_{nad}$  sont inversés c'est-à-dire un pour la forêt et un pour les champs agricoles. Finalement, pour notre troisième cas d'étude (retrieval 2 sur la figure 21), le  $\tau_{nad}$  pour les forêts fut fixé à une valeur de 0.9 et seul le  $\tau_{nad}$  sur les champs agricoles a été inversé. M. Barré [A6] a montré que la configuration d'inversion avec une SM et deux  $\tau_{nad}$  donnait les meilleurs résultats. Un tel exercice mérite d'être étendu et reproduit avec d'autres données expérimentales pour évaluer sa plus-value réelle par rapport à la configuration existante.

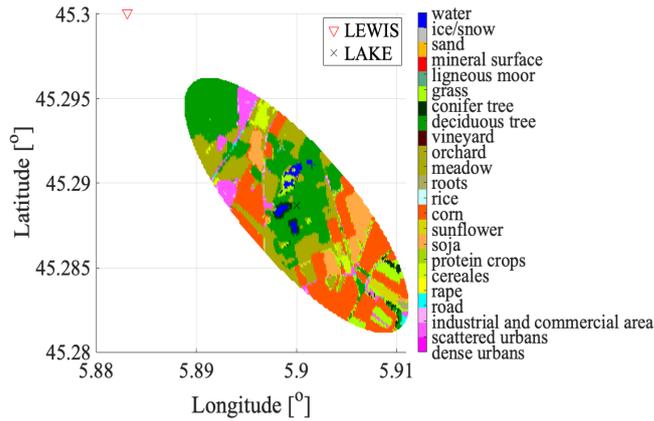


FIGURE 20 – Classification de surface pour le site appelé "Lake" sur le site expérimental de St Hilaire (près de Grenoble en Isère). L'ellipse représente la zone géographique observée par le radiomètre LEWIS. La classification est issue de la carte OSO [Inglada et al., 2017]. Figure tirée du rapport de stage de M. Barrée (2020).

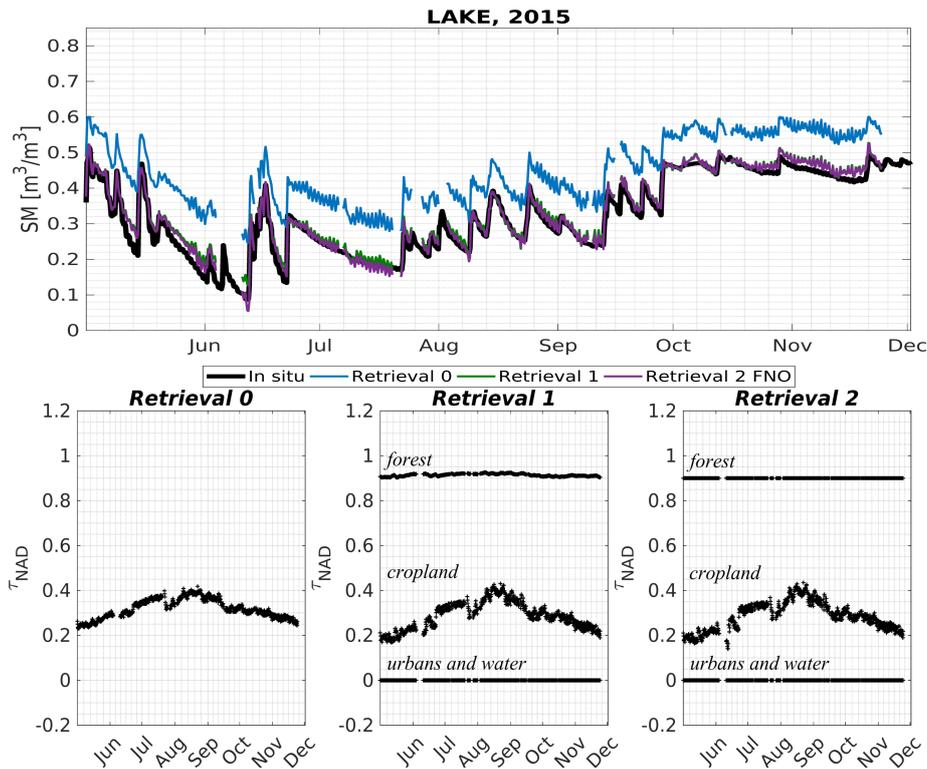


FIGURE 21 – Inversion de SM (figure du haut) et  $\tau_{nad}$  (ou VOD) (trois figures du bas) à partir des données du radiomètre LEWIS, site expérimental de St Hilaire du Touvet dans l'Isère. Les trois cas de  $\tau_{nad}$  correspondent au cas suivant, pour lesquels une SM caractérise tout le champ de vue mais : i) à gauche, un  $\tau_{nad}$  pour tout le champ de vue du radiomètre; ii) au milieu, un  $\tau_{nad}$  pour la partie forêt et un  $\tau_{nad}$  pour les champs agricoles; iii) à droite le VOD de la forêt est fixé à 0.9 et l'inversion donne un  $\tau_{nad}$  sur les champs agricoles. Figure extraite du stage de M. Barrée et du papier [A6]

## 2.6 Etalonnage et validation des données

Les jeux de données satellites existants sont amenés à évoluer suite à des changements de modèle, de données auxiliaires ou de mise à jour des paramètres. Chaque évolution est systématiquement évaluée pour mesurer le bénéfice des changements et pour s'assurer de la qualité des nouvelles versions de données. Depuis le début de ma participation à la mission SMOS une de mes activités régulières est l'évaluation des jeux de données de SM. Cette contribution fut utilisée notamment pour les publications scientifiques d'évaluation du niveau 2 [A31], du niveau 3 [A26], et lors de divers papiers sur la comparaison de produits SM tels que [A43], [A42].

Ces exercices de validation se basent essentiellement sur le réseau ISMN (International Soil Moisture Network, [Dorigo et al., 2013],[Dorigo et al., 2011]) qui regroupe une multitude de mesures d'humidité des sols et de températures acquises par divers réseaux internationaux. J'ai particulièrement axé mes études sur l'Australie en bénéficiant du réseau Oznet [Smith et al., 2012] qui apparaissent dans diverses publications sur la validation des données SMOS [A43], [A42], [A31], [A26], [A14]. A titre d'exemple, la figure 22 présente une comparaison de plusieurs versions des données SMOS de niveau 2 et de niveau 3, pour le pixel le plus proche du site de Yanco (station Y13) au sud-ouest de l'Australie. Dans ce cas présent, les évolutions de version ne montrent pas de changements nets mais conservent toutefois la qualité des inversions de SM. Les sites en Australie sont des cas particuliers car SMOS est très performant sur cette région. Ceci est dû aux conditions de surface qui sont relativement homogènes sur de grandes superficies équivalentes au champ de vue de SMOS. Les évolutions des produits SMOS peuvent en revanche aboutir à des résultats très variables suivant la complexité de la surface observée comme le montre le cas présenté sur la figure 15 aux Etats-Unis.

La comparaison entre les données SMOS et les mesures *in-situ*, nous amène aux questions d'échelle et de représentativité spatiale de ces données de terrain [Molero et al., 2018], [TN1]. Ces notions sont importantes et à considérer sérieusement lors de ces évaluations. En effet, les mesures locales (quelques  $\text{cm}^3$ ) que représentent les données *in-situ* ne sont généralement pas représentatives de l'état d'une surface de  $40 \text{ km}^2$  telle qu'observée par SMOS, indépendamment des problèmes de profondeur de pénétration. Cette question est actuellement abordée et développée dans le projet ESA FRMS4SM, dont les objectifs sont de mieux définir l'incertitude des mesures SMOS et d'identifier les régions d'intérêts pour la validation de données satellites à basse résolution spatiale (cf. paragraphe suivant). A titre d'exemple des analyses entamées pour le projet, la figure 23 montre une évaluation des données SM de SMOS pour chacun des réseaux d'humidité *in-situ* disponibles sur la plateforme ISMN. Les analyses en cours [TN1] sont développées en prenant en compte de nombreux facteurs liés aux conditions de surface, tels que le type de sonde et leur profondeur, la classification de surface des sites de mesures, de la texture du sol.

Finalement, dans le cadre de ces activités de validation et d'étalonnage, j'ai notamment suivi la thèse de S. Enache sur l'évaluation des premières données SMOS sur la région de Valence en Espagne sur le site expérimental de VAS (Valencia Anchor Station). L'objectif fut de créer un jeu de données de référence en couplant modélisation de surface (SURFEX) et bilan radiatif en bande L. Ce travail de thèse a abouti à deux publications [A53], [A54].

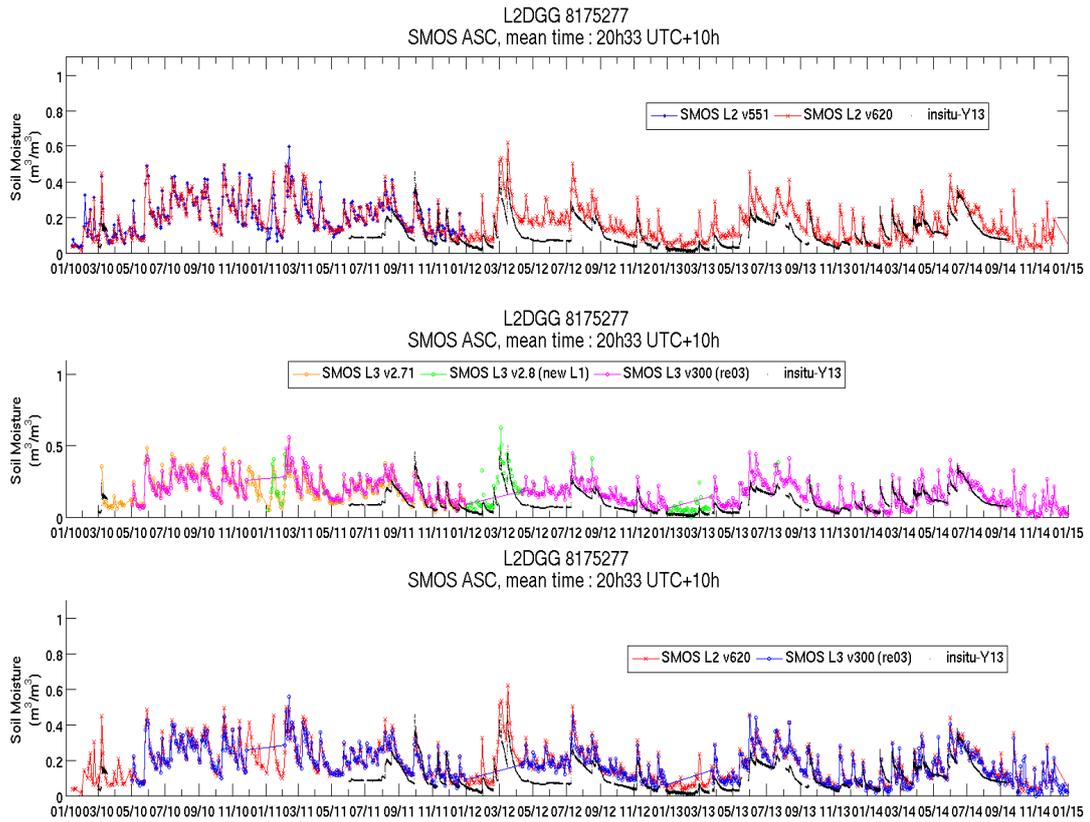


FIGURE 22 – Séries temporelles d’humidité des sols SMOS sous différentes versions du niveau 2 (versions 5 et 6) et du niveau 3 (versions 2 et 3), pour le nœud de grille correspondant au site *in-situ* de Yanco Y13 en Australie du réseau de mesure Oznet. Les données *in-situ* de la station sont reportées en noir.

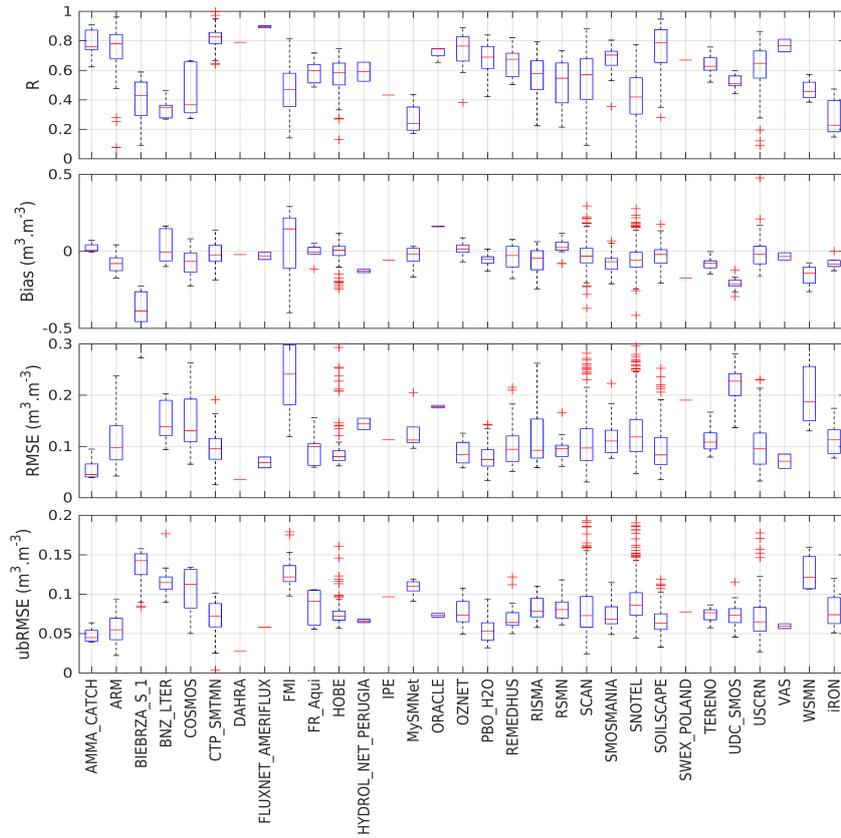


FIGURE 23 – Evaluation des produits SMOS SM de niveau 2, en termes de coefficient de corrélation  $R$ , de biais, de RMSE et de Standard Deviation Difference (que l'on trouve souvent sous le terme ubRMSE), pour les différents réseaux de données *in-situ*. Issue de la note technique [TN1] et du travail de F. Gibon.

### 3 Applications des données géophysiques pour le suivi climatique

Dans la section précédente, nous avons vu comment inverser les observations SMOS (TB) pour aboutir à une estimation de l’humidité superficielle des sols et de l’épaisseur optique de la végétation. Dans cette partie, nous allons aborder quelques applications qui sont développées avec l’équipe du CESBIO, en mettant l’accent sur l’estimation de la biomasse, l’analyse de séries temporelles et sur les hautes latitudes.

#### 3.1 VOD et lien avec la biomasse

Dès la conception, la mission SMOS avait pris en compte la possibilité d’inverser à la fois SM et le contenu en eau de la végétation grâce aux acquisitions multi-angulaires. Le concept prévoyait également, en utilisant l’information obtenue lors d’acquisition précédente, de faire cette double inversion même quand il y avait peu d’angles (i.e. en bord de trace). Cependant, au tout début de la mission, il a été constaté que la qualité des TB ne permettait pas toujours de bonnes inversions de VOD car le bruit s’y trouvait en quelque sorte reporté et tous les efforts ont été concentrés sur la SM comme décrit dans ce manuscrit. Les progrès significatifs obtenus sur la qualité des niveaux 1 (TB) ont permis, un peu plus tard, d’obtenir des VOD de qualité et ainsi de démarrer les études sur la végétation et son contenu en eau. De ce fait, au début de la mission SMOS, les travaux sur la végétation ont surtout porté sur une meilleure définition du terme  $\omega$  [Rahmoune et al., 2013] et sur le lien entre le VOD et les indices optiques de végétation [A32], [A41]. Puis une première analyse de ce VOD a mis en avant un lien existant avec des estimations de hauteurs des arbres [Rahmoune et al., 2013], tandis que l’exploitation de données à plus hautes fréquences (bandes C-X-K) a montré une relation avec des estimations de quantité de biomasse (AGB pour Above Ground Biomass) [Liu et al., 2015]. Les VOD en bandes C et X augmentent avec la quantité de biomasse mais saturent nettement pour les valeurs élevées de biomasse. Cette relation s’avère plus intéressante en bande L comme montré au cours du projet ESA SMOS+Veg et de l’analyse présentée dans [A13] sur l’Afrique. Le VOD en bande L augmente avec la quantité de biomasse mais sature beaucoup moins aux biomasses élevées que les fréquences C ou X. Cela confirme que la bande L pénètre davantage dans la couche de végétation que les bandes C et X, qui sont plus influencées par le feuillage et les petites branches, suggérant la possibilité de mieux estimer la quantité de biomasse pour des forêts denses en bande L qu’aux autres fréquences. Cette analyse fut étendue à d’autres régions [A10], [A8], [Vittucci et al., 2019] et nous pouvons voir sur la figure 24 issue de [A8], que ce lien entre VOD et AGB apparaît clairement à l’échelle globale.

Les données existantes d’AGB sont le plus souvent déduites de mesures radar et optiques [Avitabile et al., 2016], [Baccini et al., 2012], [Bouvet et al., 2018], [Saatchi et al., 2011], [Santoro et al., 2021], [Santoro et al., 2018a], [Santoro et al., 2018b] et sont pour l’instant des cartes statiques (une carte par an) et présentent des effets de saturation marqués sur les forêts denses [Mermoz et al., 2015], [A8]. Nous pouvons alors bénéficier de la longue série temporelle des observations SMOS pour évaluer les tendances saisonnières et pluriannuelles du VOD et de les relier à l’évolution de la biomasse [A16], [A15], [A12], [A17], [A10], etc ...) et de mesurer l’impact d’évènements climatiques majeurs [Wigneron et al., 2020]. Pour le moment, les diverses études utilisent des moyennes temporelles (annuelles, voir mensuelles pour [A4]), afin de s’affranchir de la variabilité journalière du VOD. Plusieurs effets sont à l’origine de cette variabilité parmi lesquels les incertitudes instrumentales, la position du nœud dans le champ de vue de l’instrument (ce qui impacte l’échantillonnage en TB) et surtout le contenu en eau de la végétation (VWC) relatif à l’hydraulique de l’eau ([Konings et al., 2019], [Konings et al., 2021], [Holtzman et al., 2021]).

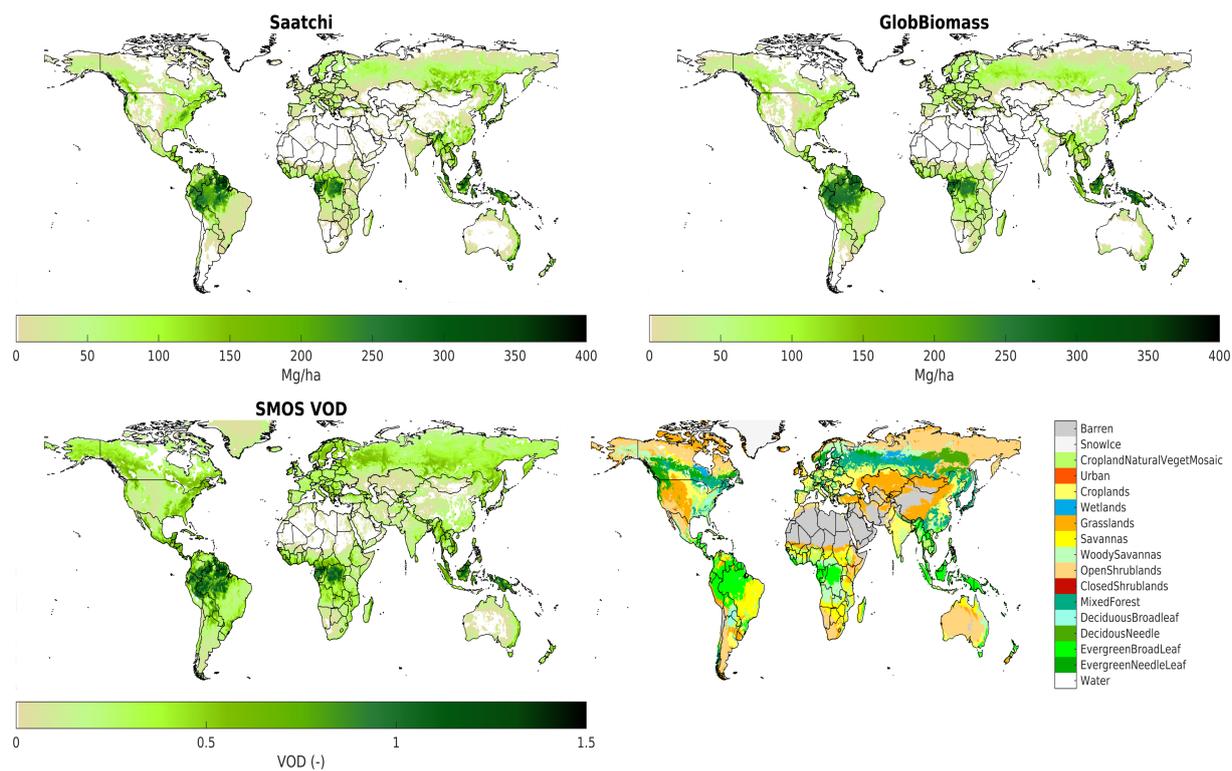


FIGURE 24 – Cartes globales d’AGB, selon [Saatchi et al., 2011] et GlobBiomass [Santoro et al., 2018a], et moyenne annuelle pour 2015 du VOD (SMOS-IC, bas à gauche); la figure du bas à droite donne les classes de végétation selon la classification IGBP [Broxton et al., 2014]. Figure issue de [A8].

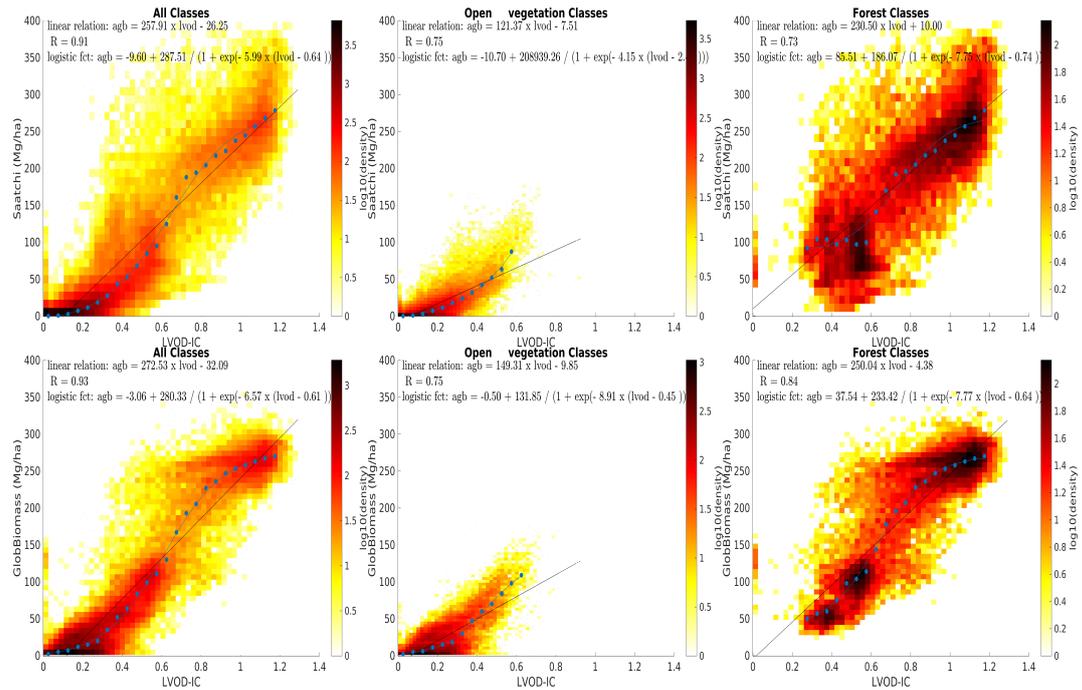


FIGURE 25 – Relations entre le VOD et les cartes d’AGB de [Saatchi et al., 2011] et GlobBiomass [Santoro et al., 2018a] et [Santoro et al., 2018b] pour l’ensemble des couverts végétaux (à gauche), pour les classes de végétation peu denses (milieu) et pour les forêts denses (à droite). Figure issue de [A8].

Les analyses de séries temporelles de VOD acquises à plusieurs fréquences (bandes L, C et X) comparées aux indices optiques classiquement utilisés (LAI, NDVI, EVI) nous permettent de mieux comprendre la mesure du VOD ainsi que l’interaction entre SM et VOD (travaux d’E. Bousquet [A1]). Le VOD caractérise la couche de végétation et à ce titre intègre le contenu en eau de ses plus gros éléments (tronc, branche, [Konings et al., 2019]). A l’heure actuelle, il est difficile de discerner ces deux contributions du VOD même si des travaux abordent cette problématique [Konings et al., 2021]. Nous bénéficierons cependant de mesures de constante diélectrique des arbres grâce à des sondes placées dans les troncs d’une forêt tropicale [P3]. En effet, le site expérimental de TropiRad à Paracou en Guyane [El Idrissi et al., 2021], développé pour la préparation de la mission satellite « biomass » de l’ESA, a été équipé en juillet 2021 d’un radiomètre en bande L [Houtz et al., 2020] ainsi que de sondes d’humidité du sol.

En plus des régions tropicales, nous nous intéressons aux forêts boréales. Une première analyse du VOD avec les biomasses des hautes latitudes montrent une dispersion plus importante que pour les régions tropicales et tempérées [A8]. Le cas des forêts boréales a été étoffé grâce à une base de données spécifiques sur le Canada [Beudoin et al., 2017b], [Beudoin et al., 2017a]. Une analyse plus poussée (figures 26, 27, 28) montre que la relation VOD - AGB est bien marquée avec une nuance suivant la saison. Nous remarquons que deux relations se dégagent pour les mois de l’automne (septembre, octobre et novembre, à droite sur les figures 26, 27, 28). Cette double relation à l’automne et au début de l’hiver est une conséquence de la présence de neige sur la végétation ou au sol, et du type de forêt (travaux en cours mai 2022, J. Ortet). Les travaux de thèse de J. Ortet (en cours) devraient aider à la prise en compte du couvert nival et pourraient nous permettre à long terme de mieux estimer le VOD en hiver lorsque la neige sèche est présente.

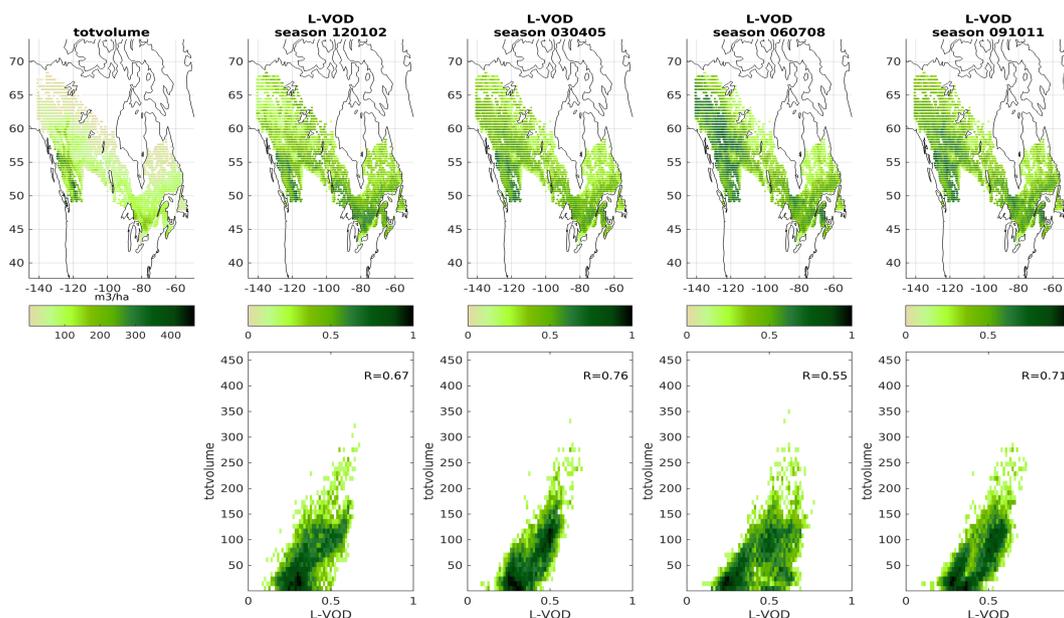


FIGURE 26 – Figures du haut : carte de volume total de végétation (m<sup>3</sup>/ha) selon [Beaudoin et al., 2017b] et [Beaudoin et al., 2017a] et de moyennes saisonnières de VOD en bande L : les chiffres en titre correspondent aux mois utilisés pour établir la moyenne : 120102 pour 12=décembre, 01=janvier et 02=février ... Les figures du bas montrent la relation entre les moyennes saisonnières de VOD (axe des abscisse) et le volume de biomasse (axe des ordonnées).

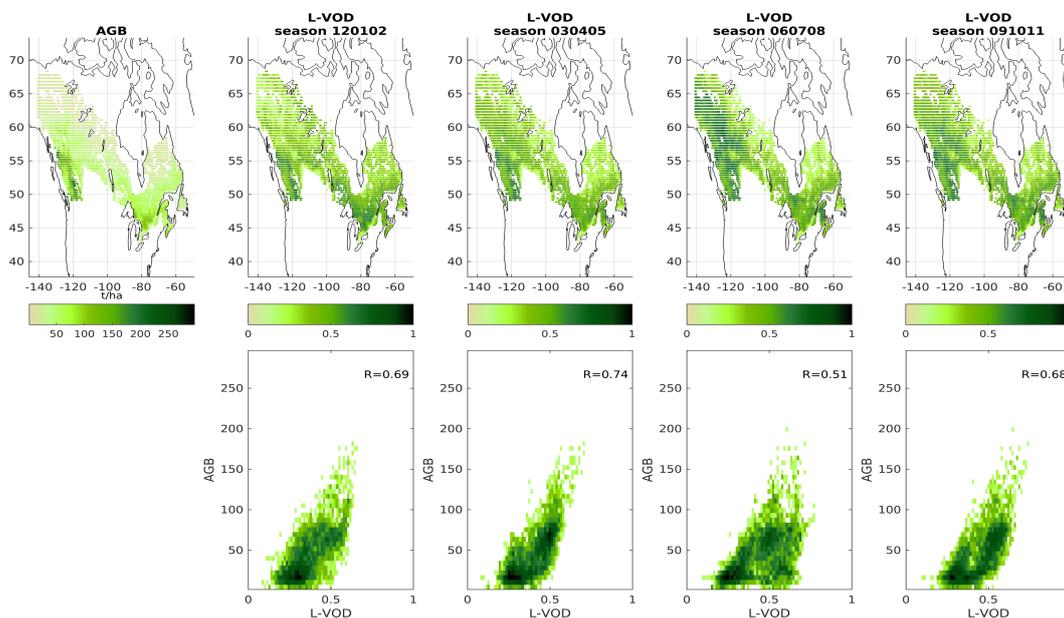


FIGURE 27 – Figures du haut : carte de quantité de biomasse vivante totale (tiges, tronc, branches, feuillage) selon [Beaudoin et al., 2017b] et [Beaudoin et al., 2017a] et de moyennes saisonnières de VOD en bande L : les chiffres en titre correspondent aux mois utilisés pour établir la moyenne : 120102 pour 12=décembre, 01=janvier et 02=février ... Les figures du bas montrent la relation entre les moyennes saisonnières de VOD (axe des abscisse) et la quantité de biomasse vivante totale (axe des ordonnées).

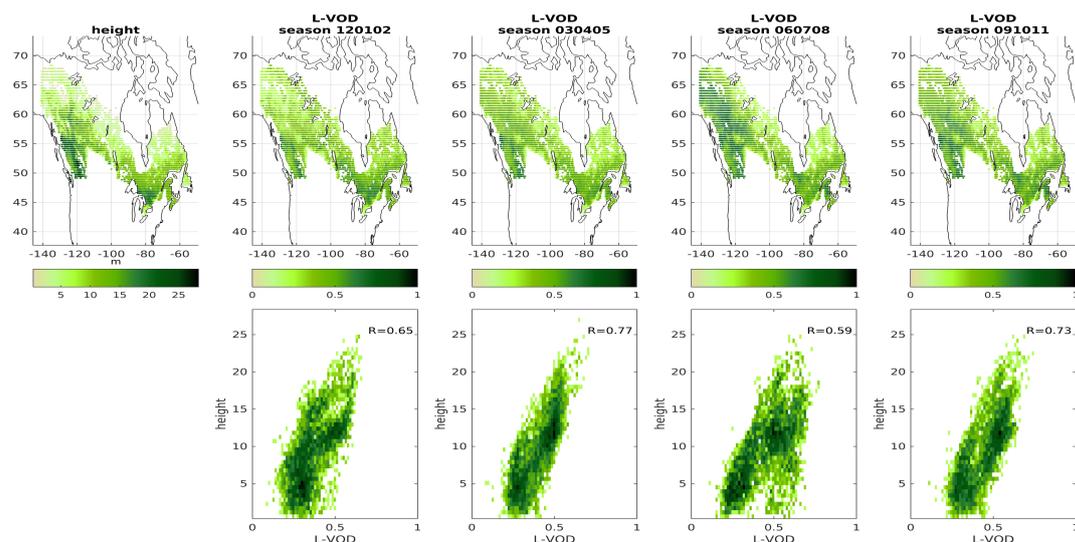


FIGURE 28 – Figures du haut : carte de hauteur des arbres (m) selon [Beaudoin et al., 2017b] et beaudoin17biomass et de moyennes saisonnières de VOD en bande L : les chiffres en titre correspondent aux mois utilisés pour établir la moyenne : 120102 pour 12=décembre, 01=janvier et 02=février ... Les figures du bas montrent la relation entre les moyennes saisonnières de VOD (axe des abscisse) et l’estimation de la hauteur des arbres (axe des ordonnées).

En plus de l’influence de la neige, il a été montré récemment que la température influence le VOD en bande L [A2]. A partir des données du site expérimental de Sodankylä en Finlande, le VOD dérivé du radiomètre Elbara augmente avec la diminution de la température vers 0 degré, puis décroît fortement lorsque la température devient négative (figure 29). Ceci est une conséquence de l’activité de la végétation qui régule son contenu en eau. La température diminuant, la végétation réduit sa sève de sa partie aubier et ainsi sa constante diélectrique [Mavrovic et al., 2018]. La couche de végétation va moins diffuser et absorber l’émission de la surface ce qui se traduit dans les modèles de transfert radiatif (paragraphe 2.3) par une diminution de l’épaisseur optique. Ce résultat est soutenu par deux études indépendantes obtenues à partir de radiomètres en bande L installés sur des sites expérimentaux au Canada [Roy et al., 2020] et en Finlande [A2]. J’ai effectué une analyse préliminaire avec les données SMOS de niveau 2 pour le pixel relatif au site de Sodankylä (figure 30) en utilisant les données de températures du centre européens ECMWF, utilisées dans l’algorithme de SMOS. La figure 30 propose des moyennes sur quinze jours pour réduire la variabilité du VOD, mais les allures observées par [A2] sont confirmées à l’échelle de SMOS.

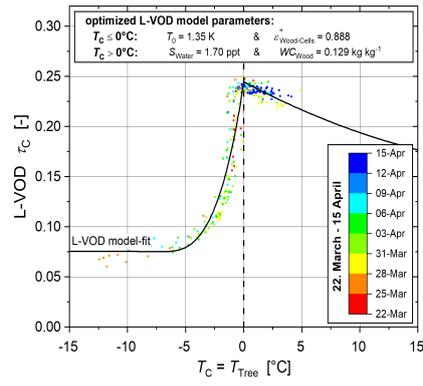


FIGURE 29 – VOD sur le site de Sodankylä en Finlande, dérivé des TB du radiomètre Elbara, en fonction de la température, issue de [A2].

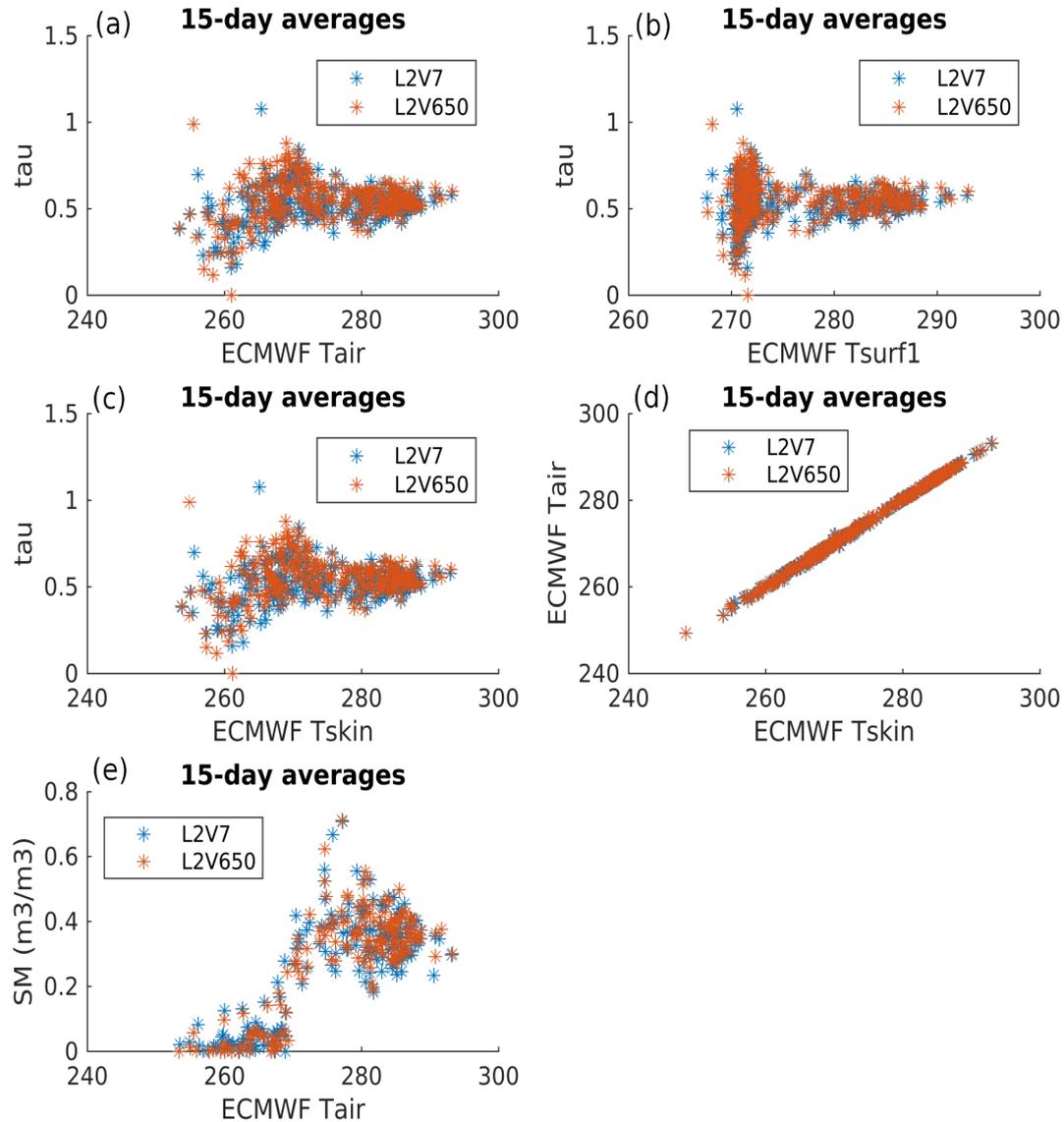


FIGURE 30 – SMOS VOD de niveau 2 pour le pixel de Sodänkyla (Finlande) en fonction des températures ECMWF : (a) de l’air Tair ; (b) la première couche du sol Tsurf1 ; (c) de peau Tskin. Les figures (d) montrent la relation entre les températures ECMWF de l’air (Tair) et de peau (Tskin) et (e) la relation de l’humidité du sol SMOS (SM) en fonction la température de l’air (Tair). Des moyennes sur 15 jours sont utilisées par souci de lisibilité.

### 3.2 Tendances d’indices de végétation

La longue série temporelle de données SMOS donne l’opportunité d’analyser les tendances du VOD et de les confronter avec d’autres indices de végétation existants, tels que les VOD issus des micro-ondes passives des instruments AMSRE et AMSR2 (bande C à 6.93-7.3 GHz, bande X à 10.65 GHz et bande K à 18 GHz) et les indices optiques (LAI, NDVI, EVI). Ces comparaisons sont intéressantes pour comprendre la complémentarité de tous ces indices pour caractériser le couvert végétal et son évolution. Une étude porte en particulier sur les effets des feux dans diverses régions du globe via les travaux d’E. Bousquet dont les dernières études sont en révision au journal Biogeosciences [A1]. La figure 31 illustre cette activité pour trois cas qui font l’objet de ce papier. Nous avons choisi ces exemples car les feux pour ces régions (zones rouges sur les figures, selon la base de données de [Giglio and Justice, 2022]) couvrent une surface suffisamment

importante par rapport à la résolution de SMOS et que les variables SM et VOD soient perturbées. On constate sur la figure 31 que tous les indices de végétation sont sensibles aux feux et à ses conséquences (sécheresse et perte de biomasse). Après les feux, les indices évoluent avec une inertie variable suivant le type de couvert végétal et le climat. En Australie (figure 31a) l'ensemble des indices évoluent conjointement mais cet événement majeur ayant eu lieu en janvier 2020, il nous faudra étendre la série temporelle à quelques années pour réellement conclure sur les allures et sur la récupération de la végétation. L'étude de Heath *et al.* [Heath et al., 2016] a estimé que la végétation de la région à l'ouest de Sydney a mis entre cinq et huit années, suivant les espèces, pour récupérer des feux de 2001/02. Pour la Californie (figure 31b), caractérisée par des forêts de conifères - dont le sequoia espèce particulièrement adaptée aux feux [Stevens et al., 2020] - , on remarque que les VOD en bandes C et X (plus sensibles au feuillage et aux branches) semblent moins impactés que la bande L et l'optique. Finalement, en forêt tropicale plus dense et humide d'Amérique du Sud (figure 31c), la bande L présente une anomalie post-feu beaucoup plus marquée et qui dure quelques années. Nous devons maintenant relier ces observations aux types de forêts et à leur fonctionnement (comme la gestion du contenu en eau). En effet, l'étude de Rogers *et al.* [Rogers et al., 2015] montre comment certaines espèces de forêts des régions boréales ont évolué face aux feux et indiquent leurs stratégies face à de tels événements [Stevens et al., 2020]. Ceci est un exemple des recherches que l'on doit mener et approfondir pour comprendre quels sont les mécanismes qui pilotent ces indices et les relier aux systèmes forestiers, qui dans les cas présentés, ont des caractéristiques bien différentes. Ceci nous amène ensuite à évaluer l'impact des grands événements climatiques tels que les El Niño. Pour expliciter cette thématique, les figures 32 et 33, montrent des séries temporelles (précipitations, SM VOD et de l'indice climatique SOI - Southern Oscillation Index) pour plusieurs régions où les impacts du phénomène climatique El Niño sont bien connus. Ces travaux tout juste démarrés avec E. Bousquet, font suite à une première tentative via le stage de B. Cluzet (cf. partie encadrement du CV en début de document), visant à regarder les impacts climatiques sur les variables observées avec SMOS. De telles études doivent être maintenant approfondies pour mieux étudier le cycle de l'eau en lien avec la végétation à divers échelles [Boé, 2013], et les liens avec les grands cycles climatiques [Nicolai-Shaw et al., 2016].

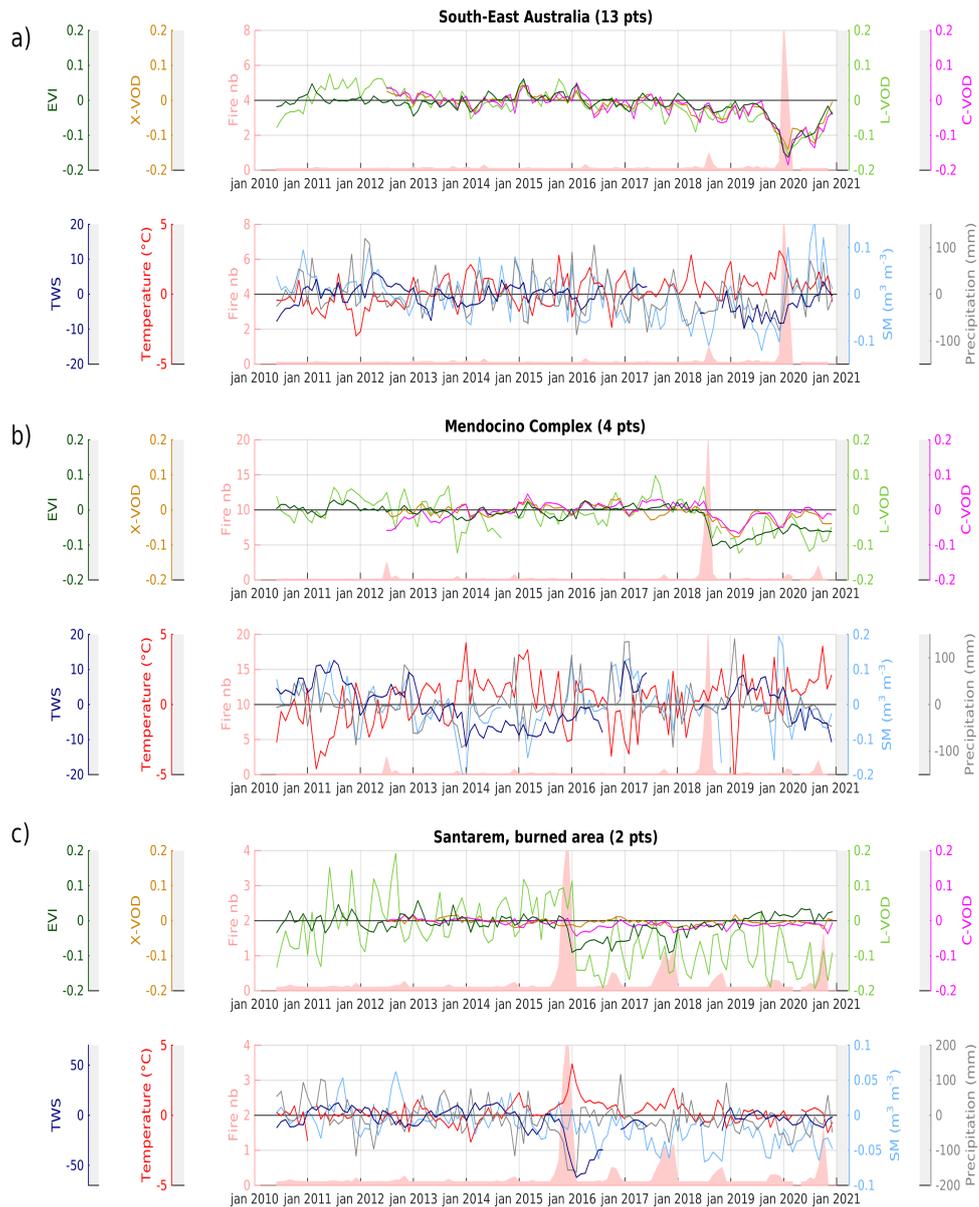


FIGURE 31 – Anomalies de Séries temporelles des indices d'EVI, X-, C-, L-VOD, P (précipitations), SM (humidité des sols), TWS (Total Water Storage, instrument GRACE), et T (Températures issues de l'instrument MODIS pour 3 cas d'études a) au sud-ouest de l'Australie (13 pixels SMOS), b) Mendocino Complex, Californie (4 pixels SMOS), c) Santarem en Amérique du Sud (2 pixels SMOS). Travaux d'E. Bousquet, extrait de [A1] en révision.



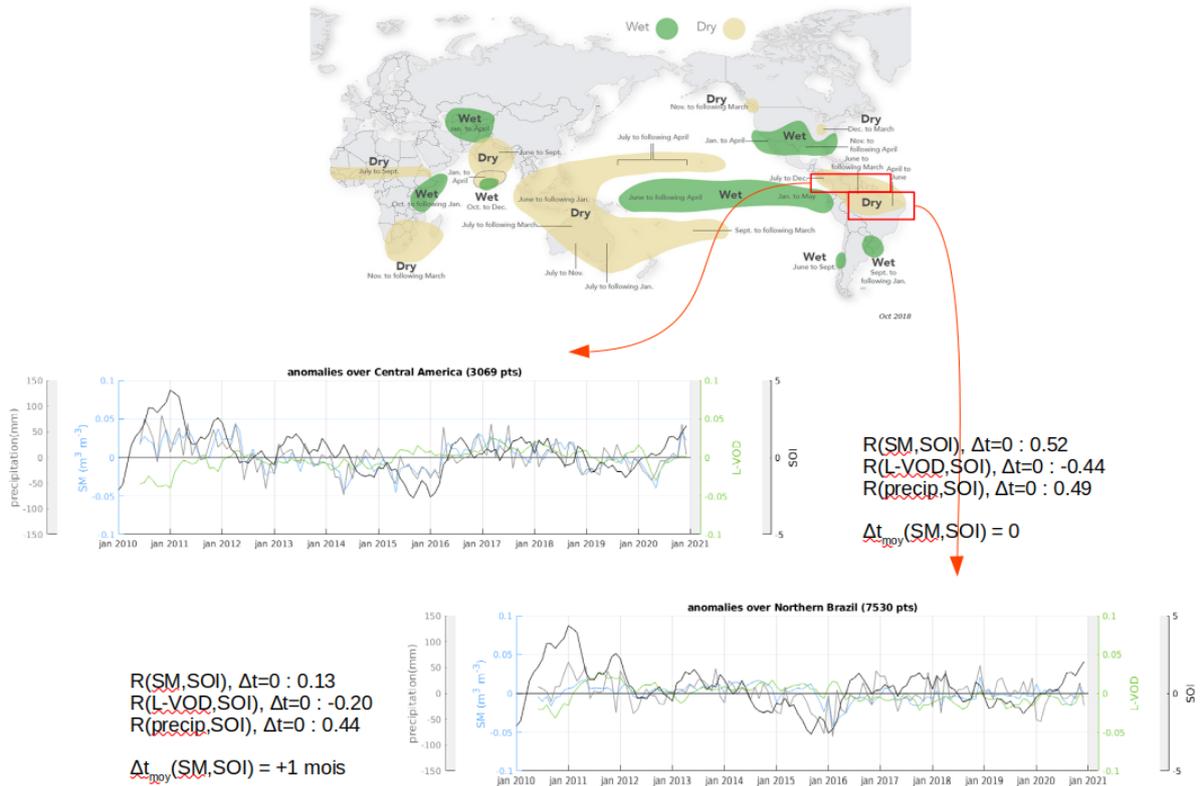


FIGURE 33 – Carte du haut : impacts connus du phénomène climatique El Niño (figure issue de [Lenssen et al., 2020]) ; figure du bas : séries temporelles de précipitations, de SM et VOD SMOS, et de l'indice climatique SOI (Southern Oscillation Index) pour deux régions en Amérique centrale et du Sud. R indique le coefficient de corrélation entre 2 indices.  $\Delta t$  indique le décalage temporel en mois ayant le meilleur R fonction d'autocorrélation. Travaux d'E. Bousquet, 2021.

### 3.3 Hautes latitudes et pergélisol

Les hautes latitudes sont caractérisées par des hivers froids et enneigés. Ces deux composantes climatiques soumettent le sol à des variations d'état importantes, passant d'un sol gelé sur une épaisseur notable (plusieurs mètres) à un sol très humide pendant l'été. Ce sol gelé ou pergélisol, peut être constamment gelé, ou bien présenter une couche active en surface qui subit les cycles de gel et dégel au fil des saisons. Spatialement, le pergélisol n'est pas continu et peut être plus ou moins localisé (sporadique). Ce sol, riche en matière organique (50% du carbone dans des sols continentaux), couvre 16% de la surface terrestre [Schuur et al., 2015], [Tarnocai et al., 2009]. Ce pergélisol est très sensible au réchauffement climatique en cours et les experts s'attendent à un dégel consécutive de ces régions, ce qui menace de libérer une quantité importante de carbone (C) dans l'atmosphère [Schuur et al., 2015]. Les estimations récentes avancent la quantité de 1014 Pg de carbone émis (incertitude de + 194 à -175 Pg [Mishra et al., 2021]. Il existe cependant encore d'importantes incertitudes sur les températures dans ces régions comme le montre l'étude de Cao *et al.* [Cao et al., 2020] qui souligne le biais des données ERA5-Land. Il est pourtant déterminant de caractériser la température de ces sols gelés ou partiellement gelés afin de suivre l'évolution du pergélisol mais également de mieux évaluer les boucles de rétroactions engendrées par le réchauffement de ces régions polaires [Schuur et al., 2015]. De plus, ces températures et notamment les températures hivernales ont une influence majeure sur le développement de la végétation arctique [Niittyinen et al., 2020], pour laquelle on observe un verdissement marqué en lien avec la fonte du pergélisol [Peng et al., 2020].

Les hautes latitudes font l'objet d'une surveillance accrue et constituent le point central de la thèse de J. Ortet que j'encadre et qui a débuté en septembre 2020. Ce projet s'effectue dans le cadre d'une cotutelle c'est-à-dire qu'il est co-financé et soutenu par plusieurs organismes, qui sont dans le cas présent l'Université du Québec à Trois Rivières (Québec, Canada) et le CNES (France). J. Ortet, inscrite aux universités de Trois Rivières et de Paul Sabatier de Toulouse, partage son temps au sein de l'université au Québec et au laboratoire d'accueil du CESBIO (université de Toulouse). A ce jour, les encadrants officiels sont A. Roy (UQTR) et Y. H. Kerr, dont je devrais prendre le relais, et ce projet bénéficie de l'expertise d'A. Royer (Université de Sherbrooke), de S. Bircher (Météo Suisse), ainsi que des échanges avec les équipes du WSL (Suisse, M. Schwank) et du FMI (Finland Meteorological Institute, K. Rautiainen) et S. Mangiarotti (CESBIO). L'objectif est de pouvoir mesurer la température du sol l'été mais également l'hiver, avec pour défi de prendre en considération la couche de neige. Obtenir la température physique du sol nous permettra de caractériser son état physique tout au long de l'année et sur plusieurs saisons. En bande L, la neige sèche est considérée comme transparente, mais en réalité elle induit des phénomènes de réfractions géométriques influençant le signal émis par la surface [Lemmetyinen et al., 2016] [A28]. En complément des données SMOS, nous envisageons d'utiliser les données des capteurs SMAP (également en bande L à 1.4 GHz) et surtout AMSR-2 qui mesurent à des fréquences supérieures en bandes C et X. Ces observations sont plus sensibles au couvert nival [Foster et al., 2005] et vont nous permettre de caractériser la couche de neige qui recouvre le sol en hiver (figure 34). Notre zone d'étude couvre pour le moment la zone de toundra arctique pour éviter l'influence d'une végétation trop importante, notamment en bandes C et X. Dans l'algorithme d'inversion des données SMOS, la température effective ([Ulaby et al., 1986]) est approximée en utilisant les températures de deux couches du sol issues des données de modèles ECMWF pondérées par un facteur qui dépend de l'humidité du sol [Holmes et al., 2006], [Kerr et al., 2020]. Ceci reste une approximation qu'il faudra sans doute vérifier, d'autant plus que des résultats récents montrent un biais des températures ERA5-Land dans ces régions polaires [Cao et al., 2020], [Burke et al., 2020], confirmant l'intérêt de ce sujet de doctorat.

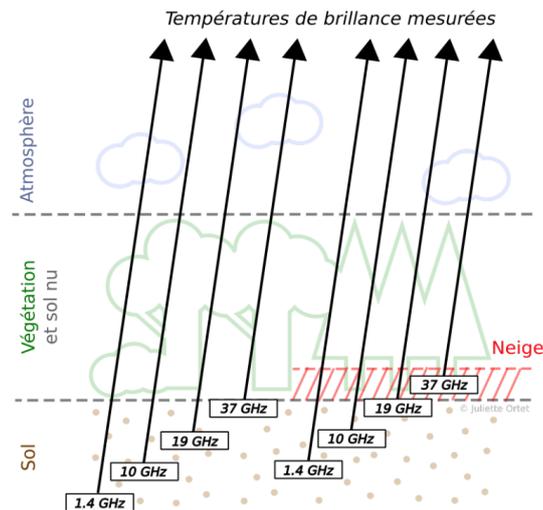


FIGURE 34 – Schéma simplifié de l'émission de la surface à différentes fréquences micro-ondes, issue du rapport de présentation de sujet de thèse de J. Ortet [Ortet, 2021]

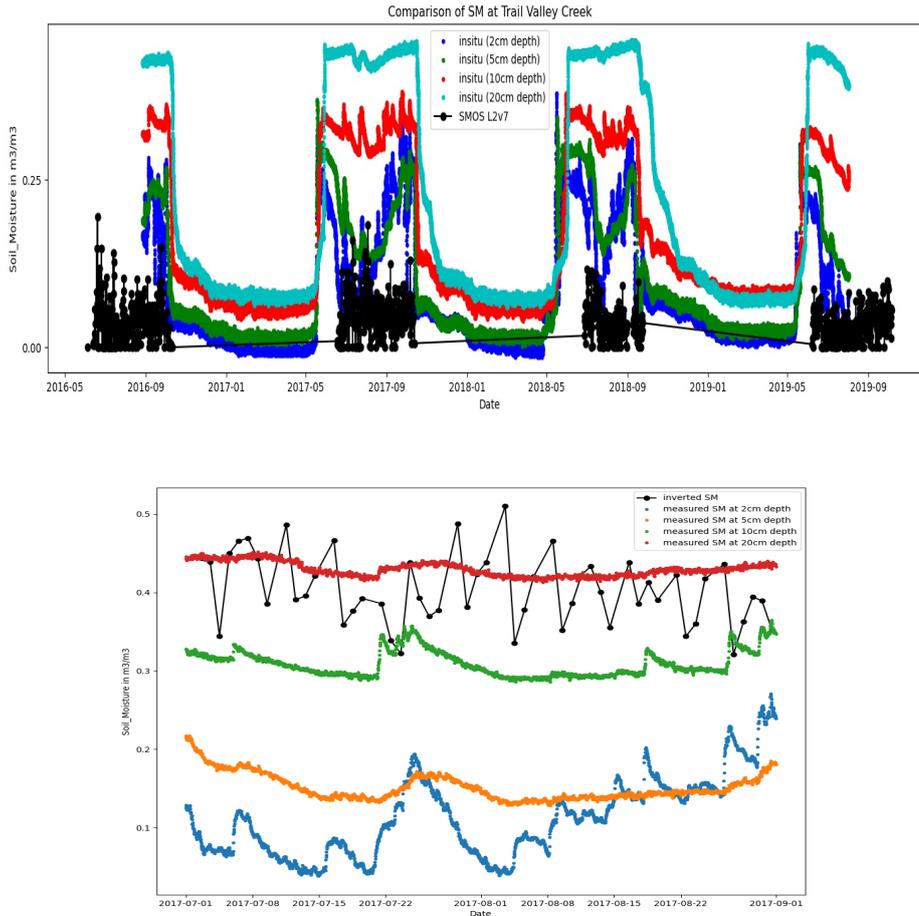


FIGURE 35 – Séries temporelles d’humidité des sols au site de Trail Valley Creek. Les sondes *in-situ* donnent les mesures à plusieurs profondeurs et les données SMOS ; La figure du haut présente toute la série temporelle, avec les SM de niveau 2 (version 7) en noir. La figure du bas est un zoom sur une période plus courte, et présente en noir une inversion des données SMOS adaptée aux conditions locales. [Ortet, 2021]

Nous allons nous attacher dans un premier temps à créer un jeu de données SMOS adapté aux hautes latitudes via l’utilisation des TB projetées sur la grille polaire. La grille EASE version 2 utilisée pour les produits SMOS du CATDS est basée sur une projection cylindrique dont les caractéristiques (i.e. dimensions des cellules) sont optimisées pour les régions tempérées. Aux hautes latitudes, les pixels sont très déformés et donc peu adaptés aux études dans ces régions [Wrona et al., 2017]. Les hautes latitudes sont couvertes en été par de nombreuses étendues d’eau libre (petits lacs, marécages etc...), dont il faudra absolument prendre en compte étant donné l’influence conséquente sur le signal mesuré par SMOS en bande L. A ce stade, plusieurs options sont envisagées comme l’utilisation des données issues du projet ESA CCI (global map of open water bodies), mais des produits avec une dynamique temporelle semblent plus appropriés pour ce projet tels que les produits GIEMS [Prigent et al., 2020] et les données GSWAF de SMOS [Parrens et al., 2017], ou la base de données de SMAP [Du et al., 2018].

J. Ortet a fait un premier exercice pour évaluer les produits SM en zone arctique en utilisant les données du site de Trail Valley Creek (figure 35). Les données *in-situ* mesurées à différentes profondeurs montrent une forte dynamique saisonnière qui n’est pas reproduite par les données SMOS de niveau 2 (série en noire sur la figure du haut). Un exercice de modélisation directe en

considérant une fraction d'eau dans le champ de vue de l'instrument, nous montre la possibilité de retrouver des valeurs de SM réalistes (figure du bas 35). Il s'agit là de premiers tests que J. Ortet a présenté au colloque annuel du Centre d'Etudes Nordiques (CEN) à Québec le 17 et 18 février et aux 18<sup>ème</sup> journées scientifiques du Comité National Français des Recherches Arctiques et Antarctiques (CNFRAA) du 10-12 Mai 2022 à Toulouse. Parmi les pistes d'améliorations possibles, il nous faudra mieux caractériser les constantes diélectriques de ces sols, souvent riches en matières organiques. Les évolutions du modèle de constante diélectrique du sol de Mironov aux sols organiques et gelés [Mironov et al., 2015] mais surtout le modèle de Bircher *et al.* [Bircher et al., 2016] seront étudiés. Dans la même idée, nous testerons le modèle de transfert radiatif Two Stream [Schwank et al., 2018] à la place du L-MEB. Des études ont comparé ces deux modèles [TN6], [Li et al., 2020] appliqués aux TB SMOS et ont montré des performances équivalentes en SM et en VOD en bande L. Cependant, le modèle Two-Stream s'avère particulièrement intéressant pour étudier les surfaces enneigées, car il permet de déduire certaines propriétés du couvert nival telles que sa densité ou son contenu en eau ([Houtz et al., 2019], [Naderpour et al., 2017]).

En parallèle de ces travaux, il est également prévu au cours des hivers 2021/22 ou plus probablement courant 2022/23, d'utiliser les sondes de constante diélectrique développées par nos collègues du laboratoire IMS de l'université de Bordeaux et l'équipe de François Demontoux [P2], [P3] afin de mesurer les effets des cycles de gel/dégel à plusieurs fréquences comprises entre 300 Hz et 2 GHz.

## 4 Perspectives de recherche

L'observation par satellite du système terrestre est devenue essentielle pour le suivi des évolutions des écosystèmes. Parmi les missions existantes, SMOS apparait comme une réussite, par la qualité des données obtenues, par sa longévité inédite (13 années) et par les nombreuses applications qui se développent sur les thématiques en hydrologie et en océanographie. Cette longévité va se poursuivre avec les récentes revues d'extension (CNES et ESA) qui permettent de prolonger l'exploitation de la mission SMOS au moins jusqu'en 2025, tout en préparant une possible suite avec SMOS-HR, ce qui souligne l'importance de ces observations. Il s'agit d'une nouvelle étape importante car des jeux de données obtenus par un unique capteur couvrant de longues périodes temporelles sont un atout pour les études climatiques. Les observations du satellite SMOS sont en ce sens novatrices car elles donnent accès à plusieurs variables essentielles de notre système climatique, liées au sol et la végétation sur les surfaces continentales, et les recherches à venir doivent s'orienter vers l'exploitation de ces données et les liens qui les unissent. Nous avons vu au cours de ce document que certaines thématiques se dégagent plus particulièrement et vont guider mes recherches à venir. L'originalité du projet présenté consiste ainsi à exploiter les variables géophysiques déduites des observations SMOS sur une période temporelle conséquente, et surtout d'étudier la complémentarité de ces données pour le suivi de l'évolution de la végétation et du cycle de l'eau. Les études actuelles se focalisent soit sur l'humidité du sol, soit sur la couche de végétation (lien entre VOD et la biomasse), et il existe peu de travaux qui visent à mieux étudier la synergie entre ces deux grandeurs. En ce sens, les thématiques qui se dégagent se regroupent selon trois axes, illustrés par la figure 36, que l'on peut résumer de la sorte : i) mesurer la température du sol gelé des hautes latitudes, axe tout juste démarré avec la thèse de J. Ortet (2021-2024) ; ii) étude de la biomasse et du contenu en eau des différents écosystèmes, grâce à la thèse de J. Salazar (2021-2024) et à la collaboration avec l'UQTR (post doc A. Gorrab) ; iii) complémentarité de ces différentes variables aux hautes latitudes et forêts boréales, liée aux problématiques environnementales telles que les feux de forêt, le cycle de l'eau et le cycle du carbone.

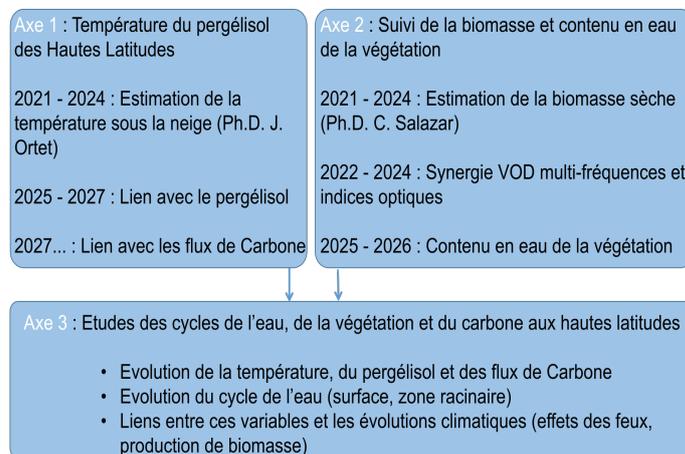


FIGURE 36 –

- Axe 1 : température du sol de la région arctique (2022-2024) et évolution du pergélisol (à partir de 2025) :

L'état du pergélisol (gelé ou non) joue un rôle majeur sur le développement de la végétation des régions arctiques [Schuur et al., 2008], et la température du sol au printemps s'avère fondamentale dans ce processus [Grünberg et al., 2020]. Natali *et al.* [Natali et al., 2019] montrent également que la température sous la neige influence directement les flux d'émission de CO<sub>2</sub> en hiver, flux qui pourraient compenser les quantités de carbone absorbées par

la végétation au cours de son développement au printemps. Cette étude s'appuie sur un réseau épars de données *in-situ*, et souligne le besoin de données spatiales pour améliorer les estimations d'émissions hivernales de carbone. Le bilan des flux d'échanges de CO<sub>2</sub> des régions boréales nécessitent donc une bonne connaissance de cette température du sol.

Cette information est à l'heure actuelle difficilement mesurable de manière continue et globale dans ces zones, à cause de la présence de neige durant une bonne partie de l'année. Une des propriétés de la radiométrie en bande L, contrairement aux fréquences plus élevées (C ou X), est d'être peu affectée par la neige sèche. Une première étape vers cet objectif est ainsi de montrer la possibilité d'obtenir cette température du sol via les observations SMOS, et surtout de développer la méthode pour évaluer l'état du sol des régions de toundra arctique. Cette thématique constitue le point central de la thèse de J. Ortet dont les résultats seront présentés fin 2024 (voir paragraphe 3.3). Ces travaux vont nous servir de base pour la suite (2025 et au delà) pour établir et relier ces températures avec l'état du pergélisol [Obu et al., 2019]. Ces sols sont des milieux complexes car ils peuvent être constitués d'une couche superficielle active qui gèle et dégèle au cours de l'année. De plus, ils sont riches en matière organique qui rend difficile la validation des données SM (voir travaux en cours de F. Gibon, [TN1] et les problèmes de calibration des sondes *in-situ*, de leur maintenance technique). Pour obtenir cette température, l'approche développée utilise les modèles de transfert radiatif couramment utilisés dans le cadre de SMOS (modèle L-MEB) qu'il faut adapter aux conditions climatiques de ces régions. Nous porterons donc une attention particulière à la présence de matière organique dans le sol, via l'utilisation du modèle de constante diélectrique de Bircher *et al.* [Bircher et al., 2016], à une meilleure estimation de la diffusion de la couche de végétation (adaptation du modèle  $\tau - \omega$ ), des effets de température sur la végétation [A2], et surtout de la constante diélectrique de la neige (modèle de [Schwank et al., 2014] et [Schwank et al., 2015]).

La suite de cette thèse (période 2025-2027), visera à l'utilisation de modèles plus spécifiques de l'émissivité de la neige tels que le modèle de HUT ou le modèle Two-Stream et l'utilisation conjointe de mesures à diverses fréquences telles que les bandes C, X, K qui sont plus sensibles à la surface de la neige et pourront nous aider à estimer la température à l'interface neige-atmosphère, voir à en déduire l'équivalent en eau de la couche de neige.

En complément, nous exploiterons les mesures de permittivité diélectrique du sol via nos collaborations avec les équipes de F. Demontoux (IMS Bordeaux) et A. Roy (UQTR, Québec) dans le cadre du programme Samuel de Champlain, soutien aux échanges entre scientifiques français et québécois. Ces deux équipes développent des sondes de permittivité diélectrique multi-fréquences, que nous utiliserons au cours des hivers/printemps 2022/23 et 2023/24, afin de mesurer les cycles de gel et de dégel des sols aux fréquences de 300 MHz - 3 GHz sur un site situé dans le Jura près d'une tourbière. La suite consistera à tirer bénéfice de ces mesures (2024-2026) dans le but de développer un modèle de constante diélectrique approprié pour suivre le cycle de gel/dégel du sol dans les régions arctiques à partir des données SMOS. La fonte de la neige et la présence d'eau liquide dans le couvert nival est une limite actuelle qui n'est absolument pas abordée pour le moment, sur laquelle il faudra mener une réflexion.

- Axe 2 : découpler le VWC de la biomasse pour le VOD

Le VOD a été récemment utilisé pour évaluer la quantité de biomasse (paragraphe 3.1), mais il a été montré expérimentalement et théoriquement [Jackson and Schmugge, 1991] que le VOD en bande L dépend principalement du contenu en eau de la végétation. Distinguer les deux contributions commence à être évoqué dans la littérature [Konings et al., 2019], [Konings et al., 2021] mais de nombreux travaux restent à mener pour réellement pouvoir extraire cette information du VOD.

Pour cela, quelques approches vont être développées. La première utilisera la synergie entre des bases de données existantes et les indices de végétation obtenus à diverses fréquences. Le travail tout juste entamé (cf paragraphe 3.2) avec les études Bousquet *et al.* [A1] nous indique que ces indices mesurent des propriétés différentes du couvert végétal. Leur utilisation conjointe est ainsi un atout pour considérer les composantes de la végétation et de l'hydraulique des arbres. La seconde approche va se baser sur les mesures des constantes diélectriques des troncs. En effet, des sondes multi-fréquences en place sur des sites en forêt tropicale (Paracou en Guyane [P3]) et en forêts boréales (sites de Baie-James et de Montmorency, [Mavrovic et al., 2018]) vont nous permettre de relier les activités des arbres aux observations satellites (SMOS, AMSR). Il nous faudra alors développer un modèle de constante diélectrique approprié pour le transfert radiatif en bande L, qui doit être relié au fonctionnement de la végétation (gestion des flux d'eau) dans le cadre du contexte des observations SMOS. Les collaborations avec les équipes « biomass » du CESBIO (L. Villard), de l'université UQTR (Canada, A. Roy) et de l'IMS (Bordeaux, F. Demontoux) sont essentielles pour atteindre ces objectifs. Une troisième approche consistera à intégrer les estimations de quantité de biomasse dans les algorithmes d'inversion des données SMOS. Les travaux de thèse de C. Salazar tout juste débutés (2022-2024), vont nous permettre de mieux estimer les quantités d'ABG à partir des TB SMOS via l'utilisation de réseaux de neurones. Nous pourrions envisager d'intégrer ces quantités estimées de biomasse dans le transfert radiatif des algorithmes SMOS et ainsi de pouvoir inverser le contenu en eau de la végétation. Il nous faudra là aussi développer et adapter les modèles de transferts radiatifs existants, qui ne sont pas optimisés pour cela [A47]. Le cas spécifique des algorithmes de niveau 3 de SMOS et l'utilisation de plusieurs orbites successives (paragraphe 2.4) nous servira de base, dont le concept de multi-orbites avec une mémoire temporelle du VOD pourra être conservé mais évoluera en fonction des résultats obtenus.

La communauté scientifique profitera à partir de 2025 des premières mesures d'estimations de la biomasse acquises en bande P grâce de la mission satellite « biomass » de l'ESA, dont le lancement est prévue en 2024. Nos collaborations actuelles avec l'équipe de la mission au CESBIO et avec l'entreprise GlobEO, nous apporteront les expertises nécessaires pour étudier tout d'abord la synergie entre ces deux missions pour étudier la végétation une fois les données à la mission « biomass » disponibles, puis ensuite pour valider l'approche de l'estimation de la biomasse entamée via la thèse de C. Salazar. Nous bénéficierons alors de données du système complet humidité dans la végétation, SM en surface et en zone racinaire, ce qui constituera un jeu de données unique pour étudier les fonctionnements à grandes échelles des grands biomes [A12], de leurs évolutions et de leurs adaptations face aux événements climatiques majeurs [Seneviratne et al., 2010], feux/sécheresses/oscillations climatiques (El Niño/La Niña).

- Axe 3 : étude de la végétation des régions sub-arctiques et des forêts boréales.

Les recherches et les travaux qui découleront des axes 1 et 2, abordés ci-dessus, nous amèneront à nous focaliser sur la biomasse des régions sub-arctiques et des forêts boréales, pour comprendre le lien entre pergélisol, sol organique et cycle de la végétation.

La température du sol au printemps influence significativement le développement de la végétation arctique [Grünberg et al., 2020]. Ces travaux se basent sur des observations riches, mais localisées dans le grand Nord canadien, ce qui constitue déjà une information précieuse. Cependant des études similaires peuvent être menées à plus large échelle et ainsi être étendues et développées à l'ensemble des régions arctiques et boréales grâce aux données SMOS. Nous pourrions ainsi évaluer et mieux définir les liens complexes entre état du pergélisol, la température du sol et son évolution saisonnière (état gelé ou dégelé), et leurs impacts sur les différents biomes de ces régions nordiques [Kreyling et al., 2008]. Dans son étude sur la

mortalité des arbres, Allen *et al.* [Allen et al., 2010] énumèrent quelques recommandations majeures (cf point 3 section 4.4 du papier en question), dont l'une souligne le manque de carte globale de végétation, données nécessaires pour calibrer et valider les modèles de dynamique de végétation (cf les points 4 de son papier et 7 intitulé « Feedbacks between physiological stress (and tree mortality) driven by climate and other forest disturbance processes »). Nous voyons que les observations SMOS et surtout les données qui sont en cours de développement et d'amélioration pour ces régions (AGB, VOD, SM) vont apporter des informations importantes pour les études de la végétation des hautes latitudes et ainsi couvrir l'ensemble des systèmes des climats nordiques.

L'évaluation de la biomasse en zone boréale est un enjeu capital du cycle du carbone compte tenu de l'évolution de la forêt face aux conséquences du réchauffement climatique. L'étude de Ma *et al.* [Ma et al., 2012] montre que le stress hydrique qui impacte les forêts boréales et plus particulièrement celles de l'Ouest du Canada, pourrait conduire ces forêts à évoluer vers des sources d'émission de carbone. L'augmentation des températures, plus marquées sur les forêts boréales ([Gauthier et al., 2015], [Price et al., 2013]), va faire évoluer significativement ces écosystèmes, pour lesquels on observe déjà une tendance soulignée par une baisse du NDVI [Sulla-Menashe et al., 2018]. Les effets attendus sont une hausse significative de la mortalité des arbres [Allen et al., 2010], ainsi qu'une migration des espèces vers le nord [Mc Kenney et al., 2007] et donc d'une modification de certains écosystèmes [Gauthier et al., 2015].

Les travaux issus des axes 1 et 2 prennent ici leur importance pour nous donner accès aux informations complémentaires et uniques sur le sol, et la biomasse et son contenu en eau, dérivées des données satellites (SMOS et SMAP). D'ici là, la série des observations SMOS devrait s'allonger de quelques années supplémentaires en vue d'évaluer les impacts des grands événements climatiques. Le cas pratique des feux permet d'explicitier l'intérêt de notre démarche. En effet, l'ensemble des prévisions climatiques envisage des étés plus secs [Parida and Buermann, 2014], ce qui va faire évoluer les sols riches en matière organique des tourbières, en matière sèche particulièrement propice au développement et à la propagation des feux ([Price et al., 2013], [Allen et al., 2010]). Ceci est préoccupant sachant que ces végétations boréales sont reconnues pour être très fragiles c'est-à-dire ayant une faible capacité à se rétablir et récupérer des effets de ces événements extrêmes [Bolton et al., 2015]. Dans ce sens, l'étude préliminaire du VOD et l'analyse temporelle de différents indices de végétation liés aux feux, travaux démarrés avec E. Bousquet ([A1] et paragraphe 3.2), seront appliqués à ces régions également sujettes à ce type d'événements ([Wang et al., 2015], [Ambadan et al., 2020]) pour évaluer la prédictibilité des conditions favorables aux feux en combinant la SM ([Bolton et al., 2015], [Forkel et al., 2012]), le VOD, la température de sol des régions riches en sol organique et les modèles de prédiction de feux. Dans notre étude [A1] les analyses des conditions pré/post feux sont actuellement tronquées pour les forêts nordiques car nous avons du filtrer les conditions hivernales. Une meilleure estimation de la végétation en hiver (présence de neige, température négative) est une étape cruciale si nous voulons étendre cette analyse à l'ensemble des régions boréales. Le cas spécifique des feux fera l'objet d'un stage de six mois en 2023 (master 2, financement acquis), dans le cadre du programme d'échange Samuel de Champlain (France-Québec), pour initier le travail préliminaire d'analyse de données.

En résumé, mes travaux menés jusqu'à maintenant et visant à obtenir des données de qualité, me permettent à présent de développer des applications des données SMOS (axes 1 et 2) en vue de les exploiter pour mieux définir et comprendre les cycles de l'eau et du carbone dans le sol et la végétation, en lien avec l'évolution des écosystèmes nordiques (toundra et forêt boréale, sols organiques) et du pergélisol (axe 3).



# Appendices

## A Campagnes de terrain

Les données satellites sont étalonnées et validées via les mesures collectées sur le terrain, grâce aux nombreuses campagnes organisées pour représenter différents écosystèmes (SMOSREX, SMAPVEX, AACES, SMOSMANIA, HOBE, Melbex, etc). La difficulté reste la différence d'échelle entre les informations acquises sur le terrain et les observations satellites basses résolutions, telles que celle de SMOS. En effet, les mesures *in-situ* sont très locales et caractérisent un volume de quelques cm<sup>3</sup> alors qu'un satellite comme SMOS observe une surface de rayon de plus 40 km. Ces mesures locales ne représentent donc pas nécessairement bien la surface observée par SMOS (cf. projet ESA FRM4SM), et sont soumises aux contraintes liées à leur installations : type de capteurs [Walker and Jetse, 2004], localisation sur le site, mouvement du sol qui entraînent de mauvaises mesures, installation délicate des sondes (verticale ou horizontale), profondeurs de pénétration et longueur des tiges des capteurs. Cependant, ces mesures sont une aide précieuse pour faire évoluer les algorithmes et les versions des produits [Albergel et al., 2012], [Gruber et al., 2013], [A31]. Depuis mon arrivée dans l'équipe SMOS, je participe et organise diverses campagnes de mesures, dont les principales sont reportées dans la suite. Participer à ces campagnes est formateur pour la compréhension de la mesure, et permet de mieux appréhender ces données lors de l'exercice de comparaison avec les données satellites (cf. le projet ESA FRM4SM). Dans la suite, je présente brièvement les campagnes de terrain auxquelles j'ai participé et qui ont donné lieu pour certaines à des stages.

### Radiomètre LEWIS

Le radiomètre LEWIS (L-band Estimation of Water in Soil, [Lemaître et al., 2004] a été développé pour le site expérimental de SMOSREX (Surface Monitoring of the SOil Reservoir Experiment, [De Rosnay et al., 2006]), près de Toulouse pour étudier les effets de surface [Escorihuela et al., 2007], comme la température du sol [Holmes et al., 2006], [Escorihuela et al., 2010], la végétation basse [Saleh et al., 2006]. En 2006, j'ai pris la continuité du site pour assurer le maintien des jeux de données de terrain. Le jeu de données a abouti à de nombreuses publications dont quelques-unes auxquelles j'ai contribué et des stages (stage de R. Toullec).

#### *LEWIS à St Hilaire*

J'ai monté cette expérience avec F. Lemaître de l'ONERA et Thierry Pellarin de l'IGE (Grenoble). Le site, financé essentiellement par le TOSCA (CNES) se situe sur la commune de St Hilaire du Touvet, en Isère, dans les Alpes françaises près de Grenoble. L'exploitation de ce site a démarré en 2014, suite à l'arrêt de la campagne SMOSREX. L'objectif a été de placer le radiomètre LEWIS suffisamment haut pour observer des scènes hétérogènes. Les campagnes aéroportées (telle que la campagne CAROLS, [A50] permettent également d'observer des scènes plus larges mais l'exploitation des données est rendue plus délicate à cause des mouvements de l'avion (roulis, tangage, lacet) et du nombre forcément limité d'acquisitions. Nous nous sommes orientés vers un site en montagne suffisamment haut. Un site similaire a été développé avec le radiomètre de l'ESA Elbara placé dans le Vercors [A28]. La scène observée fut caractéristique d'une zone montagneuse avec des effets de pentes. Le site de St Hilaire présente l'intérêt d'observer des scènes situées dans la vallée du Grésivaudan, qui est une ancienne vallée glaciaire, située à 230 m d'altitude. Localisée en amont de la ville de Grenoble, cette vallée est quasiment plate, ce qui limite les effets de topographie pour nos études. A l'inverse, les angles d'incidence nécessaires pour se décaler de la paroi

sont conséquents et se situent autour de 60°. Le radiomètre LEWIS (Figure 37) fut ainsi placé en bord de falaise à une altitude 1030m de haut, soit 800m au-dessus de la vallée. Nous avons associé un KT19 qui opère dans la bande spectrale de l'infrarouge afin de mesurer la température de surface des zones observées dans la vallée. Des sondes d'humidité ont été installées à trois endroits dans la vallée pour rendre compte de la variabilité spatiale de l'humidité superficielle de cette région (figure 40).

La figure 37 présente le site du radiomètre sur la commune de Saint Hilaire du Touvet. Le radiomètre est décalé de la paroi et suspendu dans le vide, rattaché à une structure métallique. Un grillage protège le site et restreint l'accès aux personnes autorisées. Un raccord aux réseaux électrique et téléphonique permet au radiomètre d'être sous tension, ce qui est nécessaire pour la régulation interne de l'électronique. L'abri à droite sur la photo contient un PC mais également les variateurs qui pilotent les deux moteurs qui permettent à la structure et donc au radiomètre de bouger dans les directions horizontales et verticales. F. Lemaître a développé une interface pour contrôler les mouvements du radiomètre, ainsi que les acquisitions.

La figure 38 donne une idée du champ de vue de l'instrument (figure de gauche) ainsi que des scènes observées. Celles-ci sont observées selon un cycle bien défini : 8 secondes d'acquisition pour une mesure de TB stabilisées, 3 fois à la suite, puis l'instrument effectue un mouvement de rotation pour se rendre au site suivant. Cinq scènes (Tableau 2) sont ainsi mesurées toutes les 1min30s. Trois scènes sont très hétérogènes, composées de champs agricoles, d'un bosquet forestier, d'un lac (scènes nommées "lake", "center" et "farm" dans le tableau 4). Ces trois scènes sont le sujet de l'article [A6] publié récemment.



FIGURE 37 – Radiomètre LEWIS sur le site expérimental de Saint Hilaire du Touvet. Le radiomètre est suspendu dans le vide sur une structure métallique qui dépasse de la paroi. Un grillage de protection restreint l'accès au site.

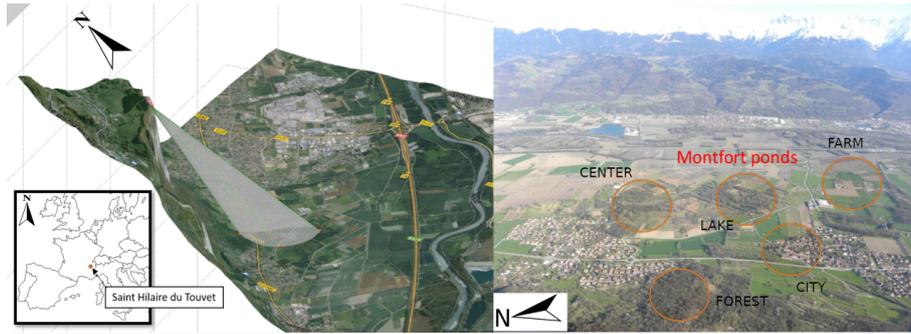


FIGURE 38 – Champ de vue du radiomètre Lewis (à gauche) et zones observées par le radiomètre (droite), issue de [A6]

<i>Frequency</i>	<i>Beamwidth</i>	<i>Orientation</i>	<i>Accuracy</i>	<i>Integration time</i>	<i>Calibration</i>
L-band	13.6°	azimuth	< 0.5 K	2s	deep sky
1.4 GHz		elevation			TBH = 6.7, TBV= 5.8

TABLE 1 – Caractéristiques du radiomètre LEWIS

<i>Name</i>	<i>Incidence Angle (°)</i>	<i>Information</i>	<i>Footprint, Ellipse dim. (in m.) per axe semi-minor x semi-major</i>
LAKE	64	Montfort pond, forest	212 x 622
CENTER	60	forest, cropland	186 x 502
FARM	66	Antan farm	229 x 695
FOREST	45	forest	71 x 153
CITY	67	buildings	168 x 423

TABLE 2 – Scènes observées par le radiomètres LEWIS, ainsi que la dimension du champ de vue du radiomètre pour chaque site.

Site	Sand (%)	Silt(%)	Clay (%)	Organic Matters (%)
1	3.1	84.6	12.3	28.5
2	7.8	80	12.2	14.7
3	17	73	10	19.3

TABLE 3 – Composition du sol (sable, argile, matière organique) pour chaque site observé par le radiomètre LEWIS.

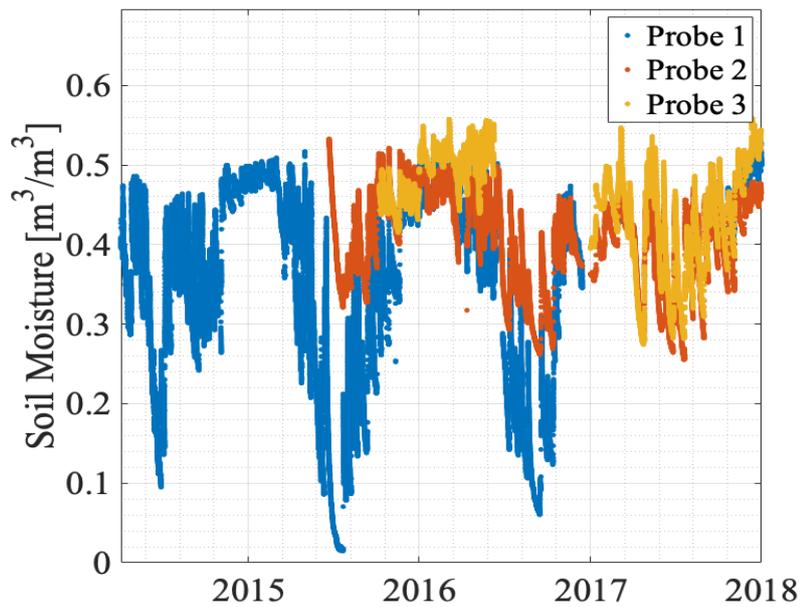


FIGURE 39 – Séries d’humidité du sol *in-situ* mesurées par des sondes à trois endroits dans la vallée du Grésivaudan issue de [A6]

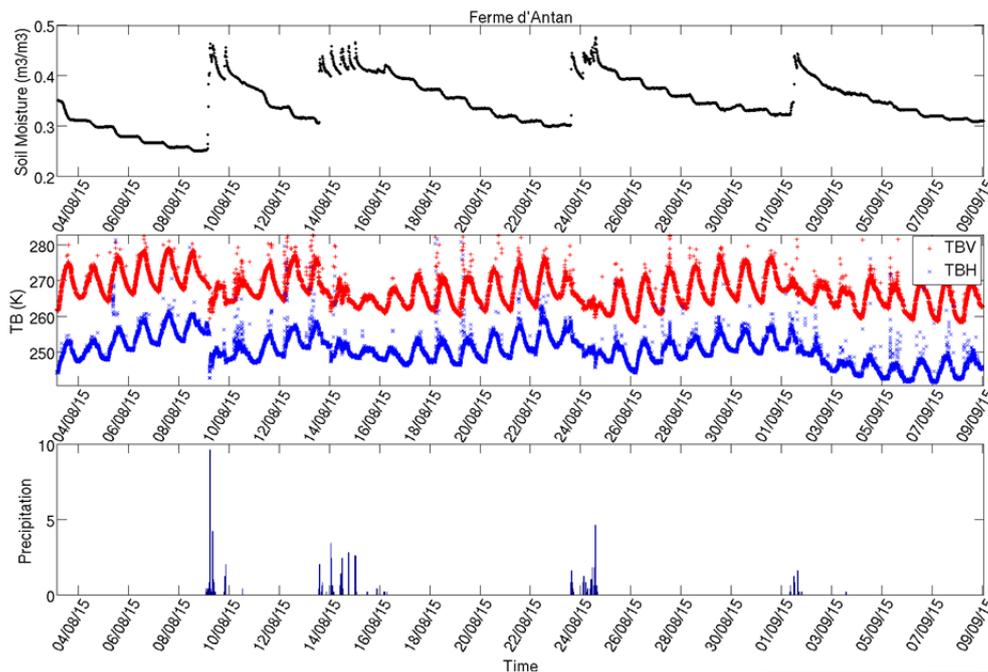


FIGURE 40 – Séries temporelles des températures des brillances acquises par le radiomètre LEWIS ; issue de issue de [A6]

Cette expérience a pour l’heure bénéficié du support de deux stages. Le premier, effectué par R. Berteloot sur 2 mois dans le cadre de son école préparatoire, a porté sur le traitement des données et ainsi la mise en place de quelques outils (Matlab). Le stage de M. Barré (printemps 2020), ingénieure Isae-Supaéro, a permis au cours de 5 mois (printemps/été 2020) d’aller plus loin dans le traitement et d’obtenir des inversions d’humidité des sols, qui ont pu être comparées

aux mesures de terrain, acquises par des capteurs installés dans la vallée. Pour ces stages, j'ai été l'encadrant principal, secondé par T. Pellarin, M. Parrens et Yann Kerr. Les principaux résultats présentés font l'objet d'une publication récemment acceptée [A6].

En 2022, il est envisagé de quitter le site pour le rendre à la commune. Le jeu de données est loin d'être complètement exploité et plusieurs études seraient intéressantes à développer dans le cadre de stages. Un stage a été demandé en 2021 sans succès et cette demande sera renouvelée pour 2022. Deux points peuvent être sujets à des études intéressantes : i) analyser et comprendre l'influence des zones urbaines ; une zone observée par le radiomètre est constituée principalement de constructions urbaines ; si la constante diélectrique de matériaux est connue, la constante diélectrique de l'ensemble n'est que peu étudiée ii) un site de forêt est également suivi en continu ; ce site présente la particularité de se situer au pied de la falaise, caractérisé par des effets de pente important.

Land cover Name	LAKE	CENTER	FARM
deciduous tree	35.52	45.60	9.90
meadow	21.52	21.61	40.14
corn	18.74	9.35	13.87
soy	6.78	7.35	8.80
grass	5.4	2.88	1.47
scattered urbans	3.61	5.33	20.03
water	2.58	2.72	0.03
conifer tree	2.03	0.41	0.39
cereals	1.49	2.75	1.75
sunflower	0.97	0.01	0.00
industrial and commercial area	0.72	1.12	3.51
road	0.28	0.24	0.04
ligneous moor	0.19	0.56	0.00
roots	0.17	0.05	0.01
rape	0.00	0.00	0.05

TABLE 4 – Land cover percentage for the LAKE, CENTER and FARM scenes, with the antenna pattern weighting function applied.

## Campagnes CAROLS

Une campagne aéroportée a été organisée principalement pour la CAL/VAL de la partie salinité des océans de la mission SMOS, mais des vols entre Toulouse et Bordeaux ont permis des études sur la surface continentale [Zribi et al., 2011], [A50], [A51]. Avec l'équipe de Météo France, j'ai participé aux campagnes de mesures au sol pour acquérir des données liées à la végétation et d'humidité du sol.

## AACES : Australian Airborne Cal/val Experiments for SMOS janvier 2010

J'ai participé aux campagnes de mesures en Australie en janvier 2010 [Peischl et al., 2012], organisées par l'équipe de Jeff Walker et Chris Rudiger (Monach University). Un radiomètre en bande L a été installé sur un avion et a survolé de larges étendues. Au sol, les équipes de terrain ont acquis de nombreuses données d'humidités (sondes et gravimétriques), de LAI, de rugosité.

### **Dome Concordia Dome C, Antarctique**

Dans le cadre des projets Bipol et Nivol portés par G. Picard (IGE), que je tiens à remercier (ainsi que Laurent Arnaud et Eric Lefebvre), j'ai eu l'opportunité d'effectuer deux séjours durant les campagnes d'été (mi-novembre - fin janvier) 2012/13 et 2018/19 sur la base franco-italienne de Dome Concordia, en Antarctique. Sur place, j'ai effectué plus particulièrement des mesures de SSA (Surface Spécifique des grains de neige) avec les instruments POSSSUM (Profiler Of Snow Specific Surface area Using SWIR reflectance Measurement) [Arnaud et al., 2011] et des mesures de densité sur plusieurs échantillons de glace prélevés à des profondeurs variables. Ces données ont permis de calibrer des modèles d'émission de la glace [A37], [A22] en Antarctique [A3].



FIGURE 41 – Forage à Dome C, été 2019



FIGURE 42 – Mesures de SSA et de densité des échantillons de glace



## Table des figures

1	Sites <i>in-situ</i> de mesures SM du réseau ISMN ( <a href="https://ismn.geo.tuwien.ac.at/en/Cartes">https://ismn.geo.tuwien.ac.at/en/Cartes</a> ). Attention, la présence d'un symbole ne signifie pas que les données <i>in-situ</i> correspondent à la période temporelle du satellite SMOS, de Gruber et al. 2020 ©ISMN.	24
2	Cartes de SM et OS de la mission SMOS. ©Dimitry Khvorostyanov, laboratoire LO-CEAN. Cartes obtenues à partir des données SM de niveau 3 et produits débiaisés de Salinité des Océans du CATDS . . . . .	27
3	Exemple d'acquisitions multi-angulaires de TB SMOS (en ordonnée) en fonction de l'angle d'incidence (en abscisse), pour un passage orbital et pour un point de grille. Les polarisations Y (rouge) et X (bleu) - dans le repère de l'antenne - sont utilisées pour obtenir la SM, à partir de TB modélisées (noir). ©P. Richaume, CESBIO . . .	28
4	Séries temporelles de a) écart type des hauteurs ( $\sigma$ ) des aiguilles du rugosimètre ; b) longueur de corrélation (LC) déduite des mesures du rugosimètre ; c) SM des sondes placées dans le champ et précipitations de la station météorologique d) émissivité du sol, déduite des mesures de TB du radiomètre LEWIS, aux polarisations H et V. Campagnes de terrain SMOSREX, 2006-2007, issue de [A48]. . . . .	31
5	Paramètres H, Q et N du modèle L-MEB, en fonction de mesures de rugosité de surface ( $\sigma$ et LC), du site expérimental de SMOSREX, issue de [A48]. . . . .	32
6	TB modélisées d'une surface inclinée, avec le modèle L-Meb dans sa configuration habituelle (traits pleins) et après correction des effets de topographie (pointillés), selon deux orientations différentes. Ces figures sont issues du rapport de stage de F. Gibon (figures 4.10 et 4.11). . . . .	33
7	Comparaison entre le NDVI et plusieurs VOD obtenues à partir du radiomètre LEWIS, sur le site expérimental situé dans les Alpes. Figure issue du stage de M. Barrée (2020) et du papier qui en est tiré [A6]. . . . .	35
8	Exercice de modélisation pour estimer l'erreur en SM et VOD due à la mauvaise prise en compte de la dynamique spatiale des étendues d'eau. Issue des travaux d'E. Bousquet et de son papier [A4]. . . . .	36
9	Illustration de trois cas de zones inondées en Amazonie, qui diffèrent par la densité du couvert végétal, tirée de [A4]. . . . .	36
10	SM et VOD inversés en fonction de la fraction d'eau $f_w$ (code couleur, correspondant aux lignes de trajectoires). L'erreur en SM et VOD s'évalue en comparant le point de départ (SM, VOD) (cercles rouges) et celui d'arrivée le long des lignes, tirée des travaux d'E. Bousquet et de son article [A4]. . . . .	36
11	Cartes spatiales de SM des données de niveau 3 version 336, et de niveau 2 version 7, pour l'Afrique, phase ascendante en haut, phase descendante en bas. Moyenne mensuelle du mois de juin 2013. . . . .	38
12	Cartes spatiales de $\tau_{nad}$ (= VOD) des données de niveau 3 version 336, et de niveau 2 de version 7, pour l'Amérique du sud, phase ascendante en haut, phase descendante en bas. Moyenne mensuelle du mois de juin 2013. . . . .	39
13	Cartes spatiales des différences de SM (figures du haut) et de $\tau_{nad}$ (ou VOD, figures du bas) telles que niveau 3 moins le niveau 2 ; moyenne mensuelle du mois de juin 2013. . . . .	39
14	Histogramme des différences en SM et VOD (cartes figure 13), entre les versions 336 du niveau 3 et version 7 du niveau 2. . . . .	40

15	Séries temporelles de SM (figure du haut), de VOD (figure du milieu) et le nombre de degrés de liberté* (figure du bas), pour le pixel relatif au site de Walnut Gulch WG (Etats-Unis) en juin 2013. Plusieurs versions des données SMOS sont affichées : niveau 2 version 7, niveau 3 version 336 (plusieurs versions) et la version du niveau 3 non corrigée (L3 re04-bug). Les données <i>in-situ</i> du site sont en pointillé. * nombre de degrés de liberté = nombre de températures de brillance moins le nombre de variables inversées (souvent égal à six, soit trois SM et trois VOD) . . . . .	41
16	Statistiques de comparaison entre les données SM de SMOS de niveau 2 et niveau 3 (ancienne version "L3old" et la nouvelle "L3new") et les données de terrain de l'ISMN. Les statistiques calculées sont le coefficient de corrélation de Pearson (R), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE Root Mean Square Error), la RMSE non biaisée (ubRMSE) et le biais. Pour chaque statistique, l'ensemble des résultats est représenté sous forme de boîte à moustaches (valeur médiane, 1er et 3eme quantile pour le rectangle). Travail de F. Gibon (contrat post doctoral sur le projet ESA FRM4SM). . . . .	42
17	Moyenne annuelle de SMOS $\tau_{nad}$ (VOD) pour juin 2011, en fonction de la quantité de biomasse issue du projet GlobBiomass. Les orbites ascendantes (descendantes) sont sur la ligne du haut (bas). La colonne de gauche est relative aux données SMOS de niveau 3 (version 336 de la campagne de retraitement n°7), celle du milieu représente le niveau 2 (version 7) et celle de droite est le produit SMOS-IC. Issue des travaux d'E. Bousquet, 2021. . . . .	43
18	Comparaison entre les $\tau_{nad}$ SMOS (VOD), le nouveau $\tau_{nad}$ de niveau 3 étant reporté sur tous les axes des abscisses. Les axes des ordonnées sont représentés par : i) colonne de gauche, le $\tau_{nad}$ de niveau 2 (version 7) ii) colonne de droite, SMOS-IC version 1. Les orbites ascendantes (06h du matin) sur la colonne du haut et les orbites descendantes (18h) sur la colonne du bas. Travaux d'E. Bousquet, 2021. . . . .	43
19	Etendues spatiales du couvert nival selon la base de données IMS (figure du haut) et ECMWF (figure du bas), pour le 31 octobre 2011, issue de la note technique [TN9].	44
20	Classification de surface pour le site appelé "Lake" sur le site expérimental de St Hilaire (près de Grenoble en Isère). L'ellipse représente la zone géographique observée par le radiomètre LEWIS. La classification est issue de la carte OSO [Inglada et al., 2017]. Figure tirée du rapport de stage de M. Barrée (2020). . . . .	46
21	Inversion de SM (figure du haut) et $\tau_{nad}$ (ou VOD) (trois figures du bas) à partir des données du radiomètre LEWIS, site expérimental de St Hilaire du Touvet dans l'Isère. Les trois cas de $\tau_{nad}$ correspondent au cas suivant, pour lesquels une SM caractérise tout le champ de vue mais : i) à gauche, un $\tau_{nad}$ pour tout le champ de vue du radiomètre; ii) au milieu, un $\tau_{nad}$ pour la partie forêt et un $\tau_{nad}$ pour les champs agricoles; iii) à droite le VOD de la forêt est fixé à 0.9 et l'inversion donne un $\tau_{nad}$ sur les champs agricoles. Figure extraite du stage de M. Barrée et du papier [A6] . . . . .	46
22	Séries temporelles d'humidité des sols SMOS sous différentes versions du niveau 2 (versions 5 et 6) et du niveau 3 (versions 2 et 3), pour le nœud de grille correspondant au site <i>in-situ</i> de Yanco Y13 en Australie du réseau de mesure Oznet. Les données <i>in-situ</i> de la station sont reportées en noir. . . . .	48
23	Evaluation des produits SMOS SM de niveau 2, en termes de coefficient de corrélation R, de biais, de RMSE et de Standard Deviation Difference (que l'on trouve souvent sous le terme ubRMSE), pour les différents réseaux de données <i>in-situ</i> . Issue de la note technique [TN1] et du travail de F. Gibon. . . . .	49

24	Cartes globales d'AGB, selon [Saatchi et al., 2011] et GlobBiomass [Santoro et al., 2018a], et moyenne annuelle pour 2015 du VOD (SMOS-IC, bas à gauche) ; la figure du bas à droite donne les classes de végétation selon la classification IGBP [Broxton et al., 2014]. Figure issue de [A8]. . . . .	51
25	Relations entre le VOD et les cartes d'AGB de [Saatchi et al., 2011] et GlobBiomass [Santoro et al., 2018a] et [Santoro et al., 2018b] pour l'ensemble des couverts végétaux (à gauche), pour les classes de végétation peu denses (milieu) et pour les forêts denses (à droite). Figure issue de [A8]. . . . .	51
26	Figures du haut : carte de volume total de végétation (m <sup>3</sup> /ha) selon [Beaudoin et al., 2017b] et [Beaudoin et al., 2017a] et de moyennes saisonnières de VOD en bande L : les chiffres en titre correspondent aux mois utilisés pour établir la moyenne : 120102 pour 12=décembre, 01=janvier et 02=février ... Les figures du bas montrent la relation entre les moyennes saisonnières de VOD (axe des abscisse) et le volume de biomasse (axe des ordonnées). . . . .	52
27	Figures du haut : carte de quantité de biomasse vivante totale (tiges, tronc, branches, feuillage) selon [Beaudoin et al., 2017b] et [Beaudoin et al., 2017a] et de moyennes saisonnières de VOD en bande L : les chiffres en titre correspondent aux mois utilisés pour établir la moyenne : 120102 pour 12=décembre, 01=janvier et 02=février ... Les figures du bas montrent la relation entre les moyennes saisonnières de VOD (axe des abscisse) et la quantité de biomasse vivante totale (axe des ordonnées). . . . .	53
28	Figures du haut : carte de hauteur des arbres (m) selon [Beaudoin et al., 2017b] et beaudoin17biomass et de moyennes saisonnières de VOD en bande L : les chiffres en titre correspondent aux mois utilisés pour établir la moyenne : 120102 pour 12=décembre, 01=janvier et 02=février ... Les figures du bas montrent la relation entre les moyennes saisonnières de VOD (axe des abscisse) et l'estimation de la hauteur des arbres (axe des ordonnées). . . . .	53
29	VOD sur le site de Sodankylä en Finlande, dérivé des TB du radiomètre Elbara, en fonction de la température, issue de [A2]. . . . .	54
30	SMOS VOD de niveau 2 pour le pixel de Sodänkyä (Finlande) en fonction des températures ECMWF : (a) de l'air Tair ; (b) la première couche du sol Tsurf1 ; (c) de peau Tskin. Les figures (d) montrent la relation entre les températures ECMWF de l'air (Tair) et de peau (Tskin) et (e) la relation de l'humidité du sol SMOS (SM) en fonction la température de l'air (Tair). Des moyennes sur 15 jours sont utilisées par souci de lisibilité. . . . .	55
31	Anomalies de Séries temporelles des indices d'EVI, X-, C-, L-VOD, P (précipitations), SM (humidité des sols), TWS (Total Water Storage, instrument GRACE), et T (Températures issues de l'instrument MODIS pour 3 cas d'études a) au sud-ouest de l'Australie (13 pixels SMOS), b) Mendocino Complex, Californie (4 pixels SMOS), c) Santarem en Amérique du Sud (2 pixels SMOS). Travaux d'E. Bousquet, extrait de [A1] en révision. . . . .	57
32	Carte du haut : impacts connus du phénomène climatique El Niño (figure issue de [Lenssen et al., 2020]) ; figure du bas : séries temporelles de précipitations, de SM et de VOD SMOS et de l'indice climatique SOI (Southern Oscillation Index) pour deux régions en Indonésie et en Australie. R indique le coefficient de corrélation entre 2 indices. $\Delta t$ indique le décalage temporel en mois ayant le meilleur coefficient de corrélation R. Travaux d'E. Bousquet, 2021. . . . .	58

33	Carte du haut : impacts connus du phénomène climatique El Niño (figure issue de [Lenssen et al., 2020]); figure du bas : séries temporelles de précipitations, de SM et VOD SMOS, et de l'indice climatique SOI (Southern Oscillation Index) pour deux régions en Amérique centrale et du Sud. R indique le coefficient de corrélation entre 2 indices. $\Delta t$ indique le décalage temporel en mois ayant le meilleur R fonction d'autocorrélation. Travaux d'E. Bousquet, 2021. . . . .	59
34	Schéma simplifié de l'émission de la surface à différentes fréquences micro-ondes, issue du rapport de présentation de sujet de thèse de J. Ortet [Ortet, 2021] . . . .	60
35	Séries temporelles d'humidité des sols au site de Trail Valley Creek. Les sondes <i>in-situ</i> donnent les mesures à plusieurs profondeurs et les données SMOS; La figure du haut présente toute la série temporelle, avec les SM de niveau 2 (version 7) en noir. La figure du bas est un zoom sur une période plus courte, et présente en noir une inversion des données SMOS adaptée aux conditions locales. [Ortet, 2021] . . .	61
36	. . . . .	63
37	Radiomètre LEWIS sur le site expérimental de Saint Hilaire du Touvet. Le radiomètre est suspendu dans le vide sur une structure métallique qui dépasse de la paroi. Un grillage de protection restreint l'accès au site. . . . .	69
38	Champ de vue du radiomètre Lewis (à gauche) et zones observées par le radiomètre (droite), issue de [A6] . . . . .	70
39	Séries d'humidité du sol <i>in-situ</i> mesurées par des sondes à trois endroits dans la vallée du Grésivaudan issue de [A6] . . . . .	71
40	Séries temporelles des températures des brillances acquises par le radiomètre LEWIS; issue de issue de [A6] . . . . .	71
41	Forage à Dome C, été 2019 . . . . .	73
42	Mesures de SSA et de densité des échantillons de glace . . . . .	73



## Liste des tableaux

1	Caractéristiques du radiomètre LEWIS . . . . .	70
2	Scènes observées par le radiomètres LEWIS, ainsi que la dimension du champ de vue du radiomètre pour chaque site. . . . .	70
3	Composition du sol (sable, argile, matière organique) pour chaque site observé par le radiomètre LEWIS. . . . .	70
4	Land cover percentage for the LAKE, CENTER and FARM scenes, with the antenna pattern weighting function applied. . . . .	72



## Références

- [ims, 2008] (2008). National Ice Center NSIDC, IMS daily Northern Hemisphere snow and ice analysis at 4 km and 24 km resolution. updated daily, 2008, boulder, CO : National Snow and Ice Data Center. Digital media. [2.4.1](#)
- [Albergel et al., 2012] Albergel, C., de Rosnay, P., Gruhier, C., Muñoz-Sabater, J., Hasenauer, S., Isaksen, L., Kerr, Y., and Wagner, W. (2012). Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. Remote Sensing of Environment, 118 :215–226. [A](#)
- [Allen et al., 2010] Allen, C. D., Macalady, A., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Venetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J., Allard, G., Running, S., Semerci, A., and Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. Forest Ecology and Management, 259 :660–684. [4](#)
- [Ambadan et al., 2020] Ambadan, J. T., Oja, M., Gedalof, Z., and Berg, A. A. (2020). Satellite-observed soil moisture as an indicator of wildfire risk. Remote Sensing, 12(10). [4](#)
- [Anderegg et al., 2019] Anderegg, W. R. L., Trugman, A. T., Bowling, D. R., Salvucci, G., and Tuttle, S. E. (2019). Plant functional traits and climate influence drought intensification and land–atmosphere feedbacks. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116(28) :14071–14076. ([document](#))
- [Arnaud et al., 2011] Arnaud, L., Picard, G., Champollion, N., Domine, F., Gallet, J., Lefebvre, E., Fily, M., and Barnola, J. (2011). Measurement of vertical profiles of snow specific surface area with a 1 cm resolution using infrared reflectance : instrument description and validation. Journal of Glaciology, 57(201) :17–29. [A](#)
- [Avitabile et al., 2016] Avitabile, V., Herald, M., G.B., H., S.L., L., Phillips, O., Asner, G., Armstrong, J., Ashton, P., Banin, L., Bayol, N., Berry, N., Boeckx, P., De Jong, B., Devries, B., Girardin, C., Kearsley, E., Lindsell, J., Lopez-Gonzalez, G., Lucas, R., Malhi, Y., Morel, A., Mitchard, E., Nagy, L., Qie, L., Quinones, M., Ryan, C., Ferry, S., Sunderland, T., Laurin, G., Gatti, R., Valentini, R., Verbeeck, H., Wijaya, A., and Willcock, S. (2016). An integrated pan tropical biomass map using multiple reference datasets. Global Change Biology, 22(4) :1406–1420. [3.1](#)
- [Baccini et al., 2012] Baccini, A., Goetz, S., and Walker, e. a. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. Nature Climate Change, 2 :182–185. [3.1](#)
- [Bates et al., 2008] Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., and Palutikof, J. E. (2008). Climate Change and Water, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva. Technical report. <https://www.ipcc.ch/publication/climate-change-and-water-2/>. ([document](#))
- [Beaudoin et al., 2017a] Beaudoin, A., Bernier, P., Villemaire, P., Guindon, L., and Guo, X. (2017a). Species composition, forest properties and land cover types across Canada’s forests at 250m resolution for 2001 and 2011. Technical report, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Laurentian Forestry Centre, Quebec, Canada. <https://doi.org/10.23687/ec9e2659-1c29-4ddb-87a2-6aced147a990>. [3.1](#), [26](#), [27](#), [4](#)
- [Beaudoin et al., 2017b] Beaudoin, A., Bernier, P., Villemaire, P., Guindon, L., and Guo, X.-J. (2017b). Tracking forest attributes across Canada between 2001 and 2011 using a kNN mapping approach applied to MODIS imagery. Canadian Journal of Forest Research, 48 :85–93. [3.1](#), [26](#), [27](#), [28](#), [4](#)
- [Berg and Sheffield, 2018] Berg, A. and Sheffield, J. (2018). Climate change and drought : the soil moisture perspective. Current Climate Change Reports, 4 (issue 2) :180–191. ([document](#))

- [Bircher et al., 2016] Bircher, S., Demontoux, F., Razafindratsima, S., Zakharova, E., Drusch, M., Wigneron, J., and Kerr, Y. (2016). L-band relative permittivity of organic soil surface layers – a new dataset of resonant cavity measurements and model evaluation. *Remote Sensing*, 8(12) :1024. [2.1](#), [3.3](#), [4](#)
- [Boé, 2013] Boé, J. (2013). Modulation of soil moisture–precipitation interactions over france by large scale circulation. *Climate Dynamics*, 40(3) :875–892. ([document](#)), [3.2](#)
- [Bojinski et al., 2014] Bojinski, S., Verstraete, M., Peterson, T. C., Richter, C., Simmons, A., and Zemp, M. (2014). The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(9) :1431 – 1443. ([document](#))
- [Bolton et al., 2015] Bolton, D. K., Coops, N. C., and Wulder, M. A. (2015). Characterizing residual structure and forest recovery following high-severity fire in the western boreal of canada using landsat time-series and airborne lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 163 :48–60. [4](#)
- [Bonan, 2008] Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change : forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *science*, 320(5882) :1444–1449. ([document](#))
- [Bonn and Rochon, 1992] Bonn, F. and Rochon, G. (1992). Précis de télédétection, volume 1 : principes et méthodes. *PUQ/AUPELF, Sainte-Foy*. ([document](#))
- [Bonn and Rochon, 1996] Bonn, F. and Rochon, G. (1996). Précis de télédétection vol 2, applications thématiques. *Presses de l’Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy*. ([document](#))
- [Bouvet et al., 2018] Bouvet, A., Mermoz, S., Toan, T. L., Villard, L., Mathieu, R., Naidoo, L., , and Asner, G. P. (2018). An above-ground biomass map of african savannahs and woodlands at 25 m resolution derived from ALOS PALSAR. *Remote Sensing of Environment*, 206 :156 – 173. [3.1](#)
- [Brodzik et al., 2012] Brodzik, M. J., Billingsley, B., Haran, T., Raup, B., and Savoie, M. H. (2012). EASE-Grid 2.0 : Incremental but Significant Improvements for Earth-Gridded Data Sets. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(1) :32–45. ISSN 2220-9964. [1.1](#)
- [Brodzik et al., 2014] Brodzik, M. J., Billingsley, B., Haran, T., Raup, B., and Savoie, M. H. (2014). Correction : Brodzik, M.J., et al. EASE-Grid 2.0 : Incremental but Significant Improvements for Earth-Gridded Data Sets. *ISPRS International J. of Geo-Information* 2012, 1, 32–45. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3(3) :1154–1156. ISSN 2220-9964. [1.1](#)
- [Broxton et al., 2014] Broxton, P., Zeng, X., Sulla-Menashe, D., and Troch, P. (2014). A global land cover climatology using modis data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(6) :1593 – 1605. [24](#), [4](#)
- [Burke et al., 2020] Burke, E. J., Zhang, Y., and Krinner, G. (2020). Evaluating permafrost physics in the coupled model intercomparison project 6 (cmip6) models and their sensitivity to climate change. *The Cryosphere*, 14(9) :3155–3174. [3.3](#)
- [Cao et al., 2020] Cao, B., Gruber, S., Zheng, D., and Li, X. (2020). The era5-land soil temperature bias in permafrost regions. *The Cryosphere*, 14(8) :2581–2595. [3.3](#)
- [Chaparro et al., 2018] Chaparro, D., Piles, M., Vall-Llossera, M., Camps, A., Konings, A. G., and Entekhabi, D. (2018). L-band vegetation optical depth seasonal metrics for crop yield assessment. *Remote Sensing of Environment*, 212 :249–259. [2.3](#)
- [Chen et al., 2018] Chen, F., Crow, W. T., Bindlish, R., Colliander, A., Burgin, M. S., Asanuma, J., and Aida, K. (2018). Global-scale evaluation of smap, smos and ascats soil moisture products using triple collocation. *Remote Sensing of Environment*, 214 :1–13. ([document](#))
- [Chuvieco, 2008] Chuvieco, E. (2008). *Earth observation of global change : The role of satellite remote sensing in monitoring the global environment*. Springer. ([document](#))

- [De Rosnay et al., 2006] De Rosnay, P., Calvet, J.-C., Kerr, Y., Wigneron, J.-P., Lemaître, F., Escorihuela, M. J., Sabater, J. M., Saleh, K., Barrié, J., Bouhours, G., et al. (2006). Smosrex : A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing. Remote Sensing of Environment, 102(3-4) :377–389. [2.2](#), [A](#)
- [Dobson et al., 1985] Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T., and El-Rayes, M. A. (1985). Microwave dielectric behavior of wet soil-part ii : Dielectric mixing models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, (1) :35–46. [2.1](#)
- [Doherty, 2009] Doherty, S. J. (2009). Lessons learned from the ipcc ar4 : Scientific developments needed to understand, predict, and respond to climate change. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90 :497–513. ([document](#))
- [Dong et al., 2020] Dong, J., Crow, W. T., Tobin, K., Cosh, M. H., Bosch, D. D., Starks, P. J., Seyfried, M., and Collins, C. (2020). Comparison of microwave remote sensing and land surface modeling for surface soil moisture climatology estimation. Remote Sensing of Environment, 242 :111756. ([document](#))
- [Dorigo et al., 2011] Dorigo, W., Van Oevelen, P., Wagner, W., Drusch, M., Mecklenburg, S., Robock, A., and Jackson, T. (2011). A new international network for in situ soil moisture data. Eos, Transactions American Geophysical Union, 92(17) :141–142. [2.6](#)
- [Dorigo et al., 2013] Dorigo, W., Xaver, A., Vreugdenhil, M., Gruber, A., Hegyiova, A., Sanchis-Dufau, A., Zamojski, D., Cordes, C., Wagner, W., and Drusch, M. (2013). Global automated quality control of in situ soil moisture data from the international soil moisture network. Vadose Zone Journal, 12(3). [2.6](#)
- [Du et al., 2018] Du, J., Kimball, J. S., Galantowicz, J., Kim, S.-B., Chan, S. K., Reichle, R., Jones, L. A., and Watts, J. D. (2018). Assessing global surface water inundation dynamics using combined satellite information from smap, amsr2 and landsat. Remote sensing of environment, 213 :1–17. [3.3](#)
- [El Idrissi et al., 2021] El Idrissi, S., Villard, L., Borderies, P., Koleck, T., Burban, B., and Toan, T. L. (2021). Long-term trends of p-band temporal decorrelation over a tropical dense forest-experimental results for the biomass mission. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, pages 1–15. [2.3](#), [3.1](#)
- [Escorihuela et al., 2010] Escorihuela, M., Chanzy, A., Wigneron, J., and Kerr, Y. H. (2010). Effective soil moisture sampling depth of l-band radiometry : A case study. Remote Sensing of Environment, 114(5) :995 – 1001. [A](#)
- [Escorihuela et al., 2007] Escorihuela, M. J., Kerr, Y. H., de Rosnay, P., Wigneron, J.-P., Calvet, J.-C., and Lemaitre, F. (2007). A simple model of the bare soil microwave emission at l-band. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(7) :1978–1987. [2.2](#), [A](#)
- [Forkel et al., 2012] Forkel, M., Thonicke, K., Beer, C., Cramer, W., Bartalev, S., and Schmullius, C. (2012). Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of siberia. Environmental Research Letters, 7(4) :044021. [4](#)
- [Foster et al., 2005] Foster, J. L., Sun, C., Walker, J. P., Kelly, R., Chang, A., Dong, J., and Powell, H. (2005). Quantifying the uncertainty in passive microwave snow water equivalent observations. Remote Sensing of Environment, 94(2) :187–203. [3.3](#)
- [Gauthier et al., 2015] Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A., and Schepaschenko, D. (2015). Boreal forest health and global change. science, 349 issue 6250 :819–822. [4](#)
- [Giglio and Justice, 2022] Giglio, L. and Justice, C. (2022). MOD14A1 MODIS/Terra Thermal Anomalies/Fire Daily L3 Global 1km SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2022-01-06. [3.2](#)

- [Grillakis, 2019] Grillakis, M. G. (2019). Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. Science of The Total Environment, 660 :1245–1255. ([document](#))
- [Gruber et al., 2013] Gruber, A., Dorigo, W. A., Zwieback, S., Xaver, A., and Wagner, W. (2013). Characterizing coarse-scale representativeness of in situ soil moisture measurements from the international soil moisture network. Vadose Zone Journal, 12(2) :1–16. [A](#)
- [Grünberg et al., 2020] Grünberg, I., Wilcox, E. J., Zwieback, S., Marsh, P., and Boike, J. (2020). Linking tundra vegetation, snow, soil temperature, and permafrost. Biogeosciences, 17(16) :4261–4279. [4](#)
- [Hallikainen et al., 1985] Hallikainen, M. T., Ulaby, F. T., Dobson, M. C., El-Rayes, M. A., and Wu, L.-K. (1985). Microwave dielectric behavior of wet soil-part 1 : Empirical models and experimental observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, (1) :25–34. [2.1](#)
- [He et al., 2021] He, Q., Lu, H., Yang, K., Zhen, L., Yue, S., Li, Y., and Entekhabi, D. (2021). Global patterns of vegetation response to short-term surface water availability. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, pages 1–1. ([document](#))
- [Heath et al., 2016] Heath, J. T., Chafer, C. J., Bishop, T. F., and Van Ogtrop, F. F. (2016). Post-fire recovery of eucalypt-dominated vegetation communities in the Sydney basin, Australia. Fire Ecology, 12(3) :53–79. [3.2](#)
- [Held and Soden, 2006] Held, I. M. and Soden, B. J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. Journal of Climate, 19(21) :5686 – 5699. ([document](#))
- [Helfrich et al., 2007] Helfrich, S., McNamara, D., Ramsay, B., Baldwin, T., and Kasheta, T. (2007). Enhancements to, and forthcoming developments to the interactive multisensor snow and ice mapping system (IMS). Hydrological Processes, 21 (12) :1576–1586. [2.4.1](#)
- [Hirschi et al., 2011] Hirschi, M., Seneviratne, S. I., Alexandrov, V., Boberg, F., Boroneant, C., Christensen, O. B., Formayer, H., Orłowsky, B., and Stepanek, P. (2011). Observational evidence for soil-moisture impact on hot extremes in southeastern Europe. Nature Geoscience, 4(1) :17–21. ([document](#))
- [Hohenegger et al., 2009] Hohenegger, C., Brockhaus, P., Bretherton, C. S., and Schär, C. (2009). The soil moisture–precipitation feedback in simulations with explicit and parameterized convection. Journal of Climate, 22(19) :5003–5020. ([document](#))
- [Holmes et al., 2006] Holmes, T. R. H., de Rosnay, P., de Jeu, R., Wigneron, J.-P., Kerr, Y. H., Calvet, J.-C., Escorihuela, M.-J., Saleh, K., and Lemaître, F. (2006). A new parameterization of the effective temperature for L band radiometry. Geophys. Res. Lett., 33. [1.3](#), [3.3](#), [A](#)
- [Holtzman et al., 2021] Holtzman, N. M., Anderegg, L. D., Kraatz, S., Mavrovic, A., Sonnentag, O., Pappas, C., Cosh, M. H., Langlois, A., Lakhankar, T., Tesser, D., et al. (2021). L-band vegetation optical depth as an indicator of plant water potential in a temperate deciduous forest stand. Biogeosciences, 18(2) :739–753. [3.1](#)
- [Houtz et al., 2020] Houtz, D., Naderpour, R., and Schwank, M. (2020). Portable L-band radiometer (POLRA) : Design and characterization. Remote Sensing, 12(17) :2780. [3.1](#)
- [Houtz et al., 2019] Houtz, D., Naderpour, R., Schwank, M., and Steffen, K. (2019). Snow wetness and density retrieved from L-band satellite radiometer observations over a site in the West Greenland ablation zone. Remote Sensing of Environment, 235 :111361. [3.3](#)
- [Huntington, 2010] Huntington, T. G. (2010). Climate warming-induced intensification of the hydrologic cycle : an assessment of the published record and potential impacts on agriculture. Advances in Agronomy, 109 :1–53. ([document](#))
- [Inglada et al., 2017] Inglada, J., Vincent, A., Arias, M., Tardy, B., Morin, D., and Rodes, I. (2017). Operational high resolution land cover map production at the country scale using satellite image time series. Remote Sensing, 9(1) :95. [20](#), [4](#)

- [Jackson and Schmugge, 1991] Jackson, T. and Schmugge, T. (1991). Vegetation effects on the microwave emission of soils. Remote Sensing of Environment, 36(3) :203–212. 4
- [Kerr et al., 2020] Kerr, Y., Richaume, P., Waldteufel, P., Ferrazzoli, P., Wigneron, J., Schwank, M., and Rautiainen, K. (2020). Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the smos level 2 soil moisture processor. Technical Report TN-ESL-SM-GS-0001-4b SM-ESL (CBSA), page 145p. 1.2, 1.2, 2.3, 2.4, 2.5, 3.3
- [Kerr, 2007] Kerr, Y. H. (2007). Soil moisture from space : Where are we ? Hydrogeology journal, 15(1) :117–120. ([document](#))
- [Kerr et al., 2010] Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J., Delwart, S., Cabot, F., Boutin, J., Escorihuela, M., Font, J., Reul, N., Gruhier, C., Juglea, S. E., Drinkwater, M. R., Hahne, A., Martín-Neira, M., and Mecklenburg, S. (2010). The smos mission : New tool for monitoring key elements of the global water cycle. Proceedings of the IEEE, 98(5) :666–687. ([document](#)), 1.1
- [Kerr et al., 2001] Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J.-P., Martinuzzi, J., Font, J., and Berger, M. (2001). Soil moisture retrieval from space : The soil moisture and ocean salinity (smos) mission. IEEE transactions on Geoscience and remote sensing, 39(8) :1729–1735. ([document](#))
- [Klein and Swift, 1977] Klein, L. and Swift, C. (1977). An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies. IEEE transactions on antennas and propagation, 25(1) :104–111. 2.1
- [Konings et al., 2021] Konings, A. G., Holtzman, N. M., Rao, K., Xu, L., and Saatchi, S. S. (2021). Interannual variations of vegetation optical depth are due to both water stress and biomass changes. Geophysical Research Letters, 48(16) :e2021GL095267. 2.3, 3.1, 3.1, 4
- [Konings et al., 2019] Konings, A. G., Rao, K., and Steele-Dunne, S. C. (2019). Macro to micro : microwave remote sensing of plant water content for physiology and ecology. New Phytologist, 223(3) :1166–1172. 2.3, 3.1, 3.1, 4
- [Kreyling et al., 2008] Kreyling, J., Beierkuhnlein, C., Pritsch, K., Schloter, M., and Jentsch, A. (2008). Recurrent soil freeze–thaw cycles enhance grassland productivity. New Phytologist, 177(4) :938–945. 4
- [Kundzewicz, 2008] Kundzewicz, Z. W. (2008). Climate change impacts on the hydrological cycle. Ecohydrology & Hydrobiology, 8(2) :195–203. ([document](#))
- [Kurum, 2013] Kurum, M. (2013). Quantifying scattering albedo in microwave emission of vegetated terrain. Remote Sensing of Environment, 129 :66–74. 2.3
- [Lei et al., 2018] Lei, F., Crow, W. T., Holmes, T. R. H., Hain, C., and Anderson, M. C. (2018). Global investigation of soil moisture and latent heat flux coupling strength. Water Resources Research, 54(10) :8196–8215. ([document](#))
- [Lemaître et al., 2004] Lemaître, F., Poussiere, J.-C., Kerr, Y. H., Déjus, M., Durbe, R., de Rosnay, P., and Calvet, J.-C. (2004). Design and test of the ground-based l-band radiometer for estimating water in soils (lewis). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(8) :1666–1676. 2.2, A
- [Lemmetyinen et al., 2016] Lemmetyinen, J., Schwank, M., Rautiainen, K., Kontu, A., Parkkinen, T., Mätzler, C., Wiesmann, A., Wegmüller, U., Derksen, C., Toose, P., et al. (2016). Snow density and ground permittivity retrieved from l-band radiometry : Application to experimental data. Remote sensing of environment, 180 :377–391. 3.3
- [Lensen et al., 2020] Lensen, N. J. L., Goddard, L., and Mason, S. (2020). Seasonal forecast skill of enso teleconnection maps. Weather and Forecasting, 35(6) :2387 – 2406. 32, 33, 4
- [Li et al., 2020] Li, A., Al-Yaari, A., Schwank, M., Fan, L., Frappart, F., Swenson, J., and Wigneron, J.-P. (2020). Compared performances of smos-ic soil moisture and vegetation optical depth retrievals based on tau-omega and two-stream microwave emission models. Remote Sensing of Environment, 236 :111502. 3.3

- [Liu et al., 2015] Liu, Y. Y., Van Dijk, A. I., De Jeu, R. A., Canadell, J. G., McCabe, M. F., Evans, J. P., and Wang, G. (2015). Recent reversal in loss of global terrestrial biomass. Nature Climate Change, 5(5) :470–474. [3.1](#)
- [Ma et al., 2012] Ma, Z., Peng, C., Zhu, Q., Chen, H., Yu, G., Li, W., Zhou, X., Wang, W., and Zhang, W. (2012). Regional drought-induced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(7) :2423–2427. [4](#)
- [Masson-Delmotte et al., 2021] Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. e. (2021). Pcc, 2021 : Climate change 2021 : The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Technical report, IPCC. Cambridge University Press. In Press., <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. ([document](#))
- [Mavrovic et al., 2020] Mavrovic, A., Pardo Lara, R., Berg, A., Demontoux, F., Royer, A., and Roy, A. (2020). Soil dielectric characterization at l-band microwave frequencies during freeze-thaw transitions. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2020 :1–22. [2.1](#)
- [Mavrovic et al., 2021] Mavrovic, A., Pardo Lara, R., Berg, A., Demontoux, F., Royer, A., and Roy, A. (2021). Soil dielectric characterization during freeze-thaw transitions using l-band coaxial and soil moisture probes. Hydrology and Earth System Sciences, 25(3) :1117–1131. [2.1](#)
- [Mavrovic et al., 2018] Mavrovic, A., Roy, A., Royer, A., Filali, B., Boone, F., Pappas, C., and Sonnentag, O. (2018). Dielectric characterization of vegetation at l band using an open-ended coaxial probe. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 7(3) :195–208. [3.1](#), [4](#)
- [Mc Kenney et al., 2007] Mc Kenney, D. W., Pedlar, J. H., Lawrence, K., Campbell, K., and Hutchinson, M. (2007). Potential impacts of climate change on the distribution of north american trees. BioScience, 57 No.11 :939–948. [4](#)
- [Mecklenburg et al., 2012] Mecklenburg, S., Drusch, M., Kerr, Y. H., Font, J., Martin-Neira, M., Delwart, S., Buenadicha, G., Reul, N., Daganzo-Eusebio, E., Oliva, R., and Crapolicchio, R. (2012). ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission : Mission Performance and Operations. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 50(5) :1354 –1366. ([document](#)), [1.1](#)
- [Mermoz et al., 2015] Mermoz, S., Réjou-Méchain, M., Villard, L., Le Toan, T., Rossi, V., and Gourlet-Fleury, S. (2015). Decrease of l-band sar backscatter with biomass of dense forests. Remote Sensing of Environment, 159 :307–317. [3.1](#)
- [Mironov et al., 2013a] Mironov, V., Kerr, Y., Wigneron, J.-P., Kosolapova, L., and Demontoux, F. (2013a). Temperature- and Texture-Dependent Dielectric Model for Moist Soils at 1.4 GHz. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 10 (n3) :419 –423. [2.1](#)
- [Mironov et al., 2013b] Mironov, V., Muzalevskiy, K., and Savin, I. (2013b). Retrieving Temperature Gradient in Frozen Active Layer of Arctic Tundra Soils From Radiothermal Observations in L -Band ; Theoretical Modeling . Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, 6(3) :1781–1785. ISSN 1939-1404. [2.1](#)
- [Mironov et al., 2010] Mironov, V. L., De Roo, R. D., and Savin, I. V. (2010). Temperature-dependable microwave dielectric model for an Arctic soil. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 48(6) :2544–2556. [2.1](#)
- [Mironov and Fomin, 2009] Mironov, V. L. and Fomin, S. V. (2009). Temperature and Mineralogy Dependable Model for Microwave dielectric Spectra of Moist Soils. PIERS Online, Vol. 5, N. 5 :411–415. [2.1](#)
- [Mironov et al., 2015] Mironov, V. L., Kerr, Y. H., Kosolapova, L. G., Savin, I. V., and Muzalevskiy, K. V. (2015). A temperature-dependent dielectric model for thawed and frozen organic

- soil at 1.4 ghz. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(9) :4470–4477. [3.3](#)
- [Mironov et al., 2009] Mironov, V. L., Kosolapova, L. G., and Fomin, S. V. (2009). Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 47, N. 7 :2059–2070. [2.1](#)
- [Mishra et al., 2021] Mishra, U., Hugelius, G., Shelef, E., Yang, Y., Strauss, J., Lupachev, A., Harden, J. W., Jastrow, J. D., Ping, C.-L., Riley, W. J., Schuur, E. A. G., Matamala, R., Siewert, M., Nave, L. E., Koven, C. D., Fuchs, M., Palmtag, J., Kuhry, P., Treat, C. C., Zubrzycki, S., Hoffman, F. M., Elberling, B., Camill, P., Veremeeva, A., and Orr, A. (2021). Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks. Science Advances, 7(9). [3.3](#)
- [Mo et al., 1982] Mo, T., Choudhury, B., Schmugge, T., Wang, J., and Jackson, T. (1982). A model for microwave emission from vegetation-covered fields. Journal of Geophysical Research : Oceans, 87(C13) :11229–11237. [2.3](#)
- [Molero et al., 2018] Molero, B., Leroux, D. J., Richaume, P., Kerr, Y. H., Merlin, O., Cosh, M. H., and Bindlish, R. (2018). Multi-timescale analysis of the spatial representativeness of in situ soil moisture data within satellite footprints. Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 123(1) :3–21. [2.6](#)
- [Naderpour et al., 2017] Naderpour, R., Schwank, M., and Mätzler, C. (2017). Davos-laret remote sensing field laboratory : 2016/2017 winter season l-band measurements data-processing and analysis. Remote Sensing, 9(11) :1185. [3.3](#)
- [Natali et al., 2019] Natali, S. M., Watts, J. D., Rogers, B. M., Potter, S., Ludwig, S., Selbmann, A.-K., Sullivan, P. F., Abbott, B. W., Arndt, K. A., Birch, L., et al. (2019). Large loss of co2 in winter observed across the northern permafrost region. Nature Climate Change, 9(11) :852–857. [4](#)
- [Navalgund et al., 2007] Navalgund, R. R., Jayaraman, V., and Roy, P. (2007). Remote sensing applications : an overview. current science, pages 1747–1766. ([document](#))
- [Nicolai-Shaw et al., 2016] Nicolai-Shaw, N., Gudmundsson, L., Hirschi, M., and Seneviratne, S. I. (2016). Long-term predictability of soil moisture dynamics at the global scale : Persistence versus large-scale drivers. Geophysical Research Letters, 43(16) :8554–8562. [3.2](#)
- [Niittynen et al., 2020] Niittynen, P., Heikkinen, R., Aalto, J., Guisan, A., Kemppinen, J., and Luoto, M. (2020). Fine-scale tundra vegetation patterns are strongly related to winter thermal conditions. Nature Climate Change, 10 :1143–1148. [3.3](#)
- [Njoku and Entekhabi, 1996] Njoku, E. G. and Entekhabi, D. (1996). Passive microwave remote sensing of soil moisture. Journal of Hydrology, 184(1) :101–129. Soil Moisture Theories and Observations. ([document](#))
- [Obu et al., 2019] Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H. H., Delaloye, R., Elberling, B., Eitzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääh, A., Leibman, M., Lewkowicz, A. G., Panda, S. K., Romanovsky, V., Way, R. G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J., and Zou, D. (2019). Northern hemisphere permafrost map based on top modelling for 2000-2016 at 1 km<sup>2</sup> scale. Earth Science reviews, 193 :299–316. [4](#)
- [Oki et al., 1999] Oki, T., Entekhabi, D., and Harrold, T. I. (1999). The global water cycle. Global energy and water cycles, 10 :27. ([document](#))
- [Oliva et al., 2016] Oliva, R., Daganzo, E., Richaume, P., Kerr, Y., Cabot, F., Soldo, Y., Anterrieu, E., Reul, N., Gutierrez, A., Barbosa, J., and Lopes, G. (2016). Status of radio frequency interference (rfi) in the 1400–1427mhz passive band based on six years of smos mission. Remote Sensing of Environment, 180 :64–75. Special Issue : ESA’s Soil Moisture and Ocean Salinity Mission - Achievements and Applications. [1.3](#)

- [Ortet, 2021] Ortet, J. (2021). Mesure et suivi des températures de surface et du pergélisol des milieux arctiques par télédétection. Technical report, UQTR. Projet de thèse, ENV9302. [34](#), [35](#), [4](#)
- [O’Neill et al., 2012] O’Neill, P., Chan, S., Njoku, E., Jackson, T., and Bindlish, R. (2012). Soil moisture active passive (smap) algorithm theoretical basis document (atbd). smap level 2 & 3 soil moisture (passive),(l2\_sm\_p, l3\_sm\_p). initial release, 1. Initial Release, 1. [2.3](#), [2.3](#)
- [Parida and Buermann, 2014] Parida, B. R. and Buermann, W. (2014). Increasing summer drying in north american ecosystems in response to longer nonfrozen periods. Geophysical Research Letters, 41(15) :5476–5483. [4](#)
- [Parrens et al., 2017] Parrens, M., Al Bitar, A., Frappart, F., Papa, F., Calmant, S., Crétaux, J.-F., Wigneron, J.-P., and Kerr, Y. (2017). Mapping dynamic water fraction under the tropical rain forests of the amazonian basin from smos brightness temperatures. Water, 9(5). [3.3](#)
- [Patton and Hornbuckle, 2012] Patton, J. and Hornbuckle, B. (2012). Initial validation of smos vegetation optical thickness in iowa. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 10(4) :647–651. [2.3](#)
- [Peischl et al., 2012] Peischl, S., Walker, J. P., Rüdiger, C., Ye, N., Kerr, Y. H., Kim, E., Bandara, R., and Allahmoradi, M. (2012). The aaces field experiments : Smos calibration and validation across the murrumbidgee river catchment. Hydrology and Earth System Sciences, 16(6) :1697–1708. [A](#)
- [Peng et al., 2020] Peng, X., Zhang, T., Frauenfeld, O. W., Wang, S., Qiao, L., Du, R., and Mu, C. (2020). Northern hemisphere greening in association with warming permafrost. Journal of Geophysical Research : Biogeosciences, 125(1) :e2019JG005086. [3.3](#)
- [Price et al., 2013] Price, D. T., Alfaro, R., Brown, K., Flannigan, M., Fleming, R. A., Hogg, E., Girardin, M., Lakusta, T., Johnston, M., McKenney, D., et al. (2013). Anticipating the consequences of climate change for canada’s boreal forest ecosystems. Environmental Reviews, 21(4) :322–365. [4](#)
- [Prigent et al., 2020] Prigent, C., Jimenez, C., and Bousquet, P. (2020). Satellite-derived global surface water extent and dynamics over the last 25 years (giems-2). Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 125(3) :e2019JD030711. [3.3](#)
- [Rahmoune et al., 2013] Rahmoune, R., Ferrazzoli, P., Kerr, Y. H., and Richaume, P. (2013). Smos level 2 retrieval algorithm over forests : Description and generation of global maps. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 6(3) :1430–1439. [2.3](#), [3.1](#)
- [Ramsay, 1998] Ramsay, B. H. (1998). The interactive multisensor snow and ice mapping system . Hydrological Processes, 12 :1537–1546. [2.4.1](#)
- [Rogers et al., 2015] Rogers, B. M., Soja, A. J., Goulden, M. L., and Randerson, J. T. (2015). Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks. Nature Geoscience, 8(3) :228–234. [3.2](#)
- [Roy et al., 2020] Roy, A., Toose, P., Mavrovic, A., Pappas, C., Royer, A., Derksen, C., Berg, A., Rowlandson, T., El-Amine, M., Barr, A., et al. (2020). L-band response to freeze/thaw in a boreal forest stand from ground-and tower-based radiometer observations. Remote Sensing of Environment, 237 :111542. [3.1](#)
- [Saatchi et al., 2011] Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., and Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(24) :9899–9904. [3.1](#), [24](#), [25](#), [4](#)

- [Sahr et al., 2003] Sahr, K., White, D., and Kimerling, A. J. (2003). Geodesic discrete global grid systems. *Cartography and Geographic Information Science*, 30(2) :121–134. [1.1](#)
- [Saleh et al., 2006] Saleh, K., Wigneron, J.-P., de Rosnay, P., Calvet, J.-C., Escorihuela, M., Kerr, Y., and Waldteufel, P. (2006). Impact of rain interception by vegetation and mulch on the l-band emission of natural grass. *Remote Sensing of Environment*, 101(1) :127 – 139. [2.3](#), [A](#)
- [Santoro et al., 2021] Santoro, M., Cartus, O., Carvalhais, N., Rozendaal, D. M. A., Avitabile, V., Araza, A., de Bruin, S., Herold, M., Quegan, S., Rodríguez-Veiga, P., Balzter, H., Carreiras, J., Schepaschenko, D., Korets, M., Shimada, M., Itoh, T., Moreno Martínez, A., Cavlovic, J., Cazzolla Gatti, R., da Conceição Bispo, P., Dewnath, N., Labrière, N., Liang, J., Lindsell, J., Mitchard, E. T. A., Morel, A., Pacheco Pascagaza, A. M., Ryan, C. M., Slik, F., Vaglio Laurin, G., Verbeeck, H., Wijaya, A., and Willcock, S. (2021). The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations. *Earth System Science Data*, 13(8) :3927–3950. [2.4](#), [3.1](#)
- [Santoro et al., 2018a] Santoro, M., Cartus, O., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., Carvalhais, N., Rozendaal, D., Herold, M., Avitabile, V., Quegan, S., Carreiras, J., Rauste, Y., Balzter, H., Schmulius, C., and Seifert, F. (2018a). Globbiomass global above-ground biomass and growing stock volume datasets. Technical report, available on-line at <http://globbiomass.org/products/global-mapping>. [3.1](#), [24](#), [25](#), [4](#)
- [Santoro et al., 2018b] Santoro, M. et al. (2018b). Globbiomass - global datasets of forest biomass. Technical report, PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.894711>. [3.1](#), [25](#), [4](#)
- [Schmugge, 1978] Schmugge, T. (1978). Remote sensing of surface soil moisture. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 17(10) :1549 – 1557. ([document](#))
- [Schuur et al., 2008] Schuur, E. A. G., Bockheim, J., Canadell, J. G., Euskirchen, E., Field, C. B., Goryachkin, S. V., Hagemann, S., Kuhry, P., Lafleur, P. M., Lee, H., Mazhitova, G., Nelson, F. E., Rinke, A., Romanovsky, V. E., Shiklomanov, N., Tarnocai, C., Venevsky, S., Vogel, J. G., and Zimov, S. A. (2008). Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change : Implications for the Global Carbon Cycle. *BioScience*, 58(8) :701–714. [4](#)
- [Schuur et al., 2015] Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C., and Vonk, J. E. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520(7546) :171–179. [3.3](#)
- [Schwank et al., 2015] Schwank, M., Mätzler, C., Wiesmann, A., Wegmuller, U., Pulliainen, J., Lemmetyinen, J., Rautiainen, K., Derksen, C., Toose, P., and Drusch, M. (2015). Snow density and ground permittivity retrieved from l-band radiometry : A synthetic analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8 :1–14. [4](#)
- [Schwank et al., 2018] Schwank, M., Naderpour, R., and Mätzler, C. (2018). "tau-omega"- and two-stream emission models used for passive l-band retrievals : Application to close-range measurements over a forest. *Remote Sensing*, 10(12). [3.3](#)
- [Schwank et al., 2014] Schwank, M., Rautiainen, K., Mätzler, C., Stähli, M., Lemmetyinen, J., Pulliainen, J., Vehviläinen, J., Kontu, A., Ikonen, J., Ménard, C. B., Drusch, M., Wiesmann, A., and Wegmüller, U. (2014). Model for microwave emission of a snow-covered ground with focus on l band. *Remote Sensing of Environment*, 154 :180–191. [4](#)
- [Seneviratne et al., 2010] Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., and Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate : A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4) :125–161. ([document](#)), [4](#)
- [Seneviratne et al., 2013] Seneviratne, S. I., Wilhelm, M., Stanelle, T., van den Hurk, B., Hagemann, S., Berg, A., Cheruy, F., Higgins, M. E., Meier, A., Brovkin, V., Claussen, M., Ducharne,

- A., Dufresne, J.-L., Findell, K. L., Ghattas, J., Lawrence, D. M., Malyshev, S., Rummukainen, M., and Smith, B. (2013). Impact of soil moisture-climate feedbacks on cmip5 projections : First results from the glace-cmip5 experiment. Geophysical Research Letters, 40(19) :5212–5217. ([document](#))
- [Smith et al., 2012] Smith, A. B., Walker, J. P., Western, A. W., Young, R. I., Ellett, K. M., Pipunic, R. C., Grayson, R. B., Siriwardena, L., Chiew, F. H. S., and Richter, H. (2012). The murrumbidgee soil moisture monitoring network data set. Water Resources Research, 48(7). [2.6](#)
- [Stevens et al., 2020] Stevens, J. T., Kling, M. M., Schwilk, D. W., Varner, J. M., and Kane, J. M. (2020). Biogeography of fire regimes in western u.s. conifer forests : A trait-based approach. Global Ecology and Biogeography, 29(5) :944–955. [3.2](#)
- [Sulla-Menashe et al., 2018] Sulla-Menashe, D., Woodcock, C. E., and Friedl, M. A. (2018). Canadian boreal forest greening and browning trends : an analysis of biogeographic patterns and the relative roles of disturbance versus climate drivers. Environmental Research Letters, 13(1) :014007. [4](#)
- [Tarnocai et al., 2009] Tarnocai, C., Canadell, J., Schuur, E., Kuhry, P., Mazhitova, G., and Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. Global biogeochemical cycles, 23(2). [3.3](#)
- [Togliatti et al., 2019] Togliatti, K., Hartman, T., Walker, V. A., Arkebauer, T. J., Suyker, A. E., VanLoocke, A., and Hornbuckle, B. K. (2019). Satellite l-band vegetation optical depth is directly proportional to crop water in the us corn belt. Remote Sensing of Environment, 233 :111378. [2.3](#)
- [Ulaby et al., 1982] Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1982). Microwave remote sensing, active and passive, volume 2 : Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory. Dedham, MA, USA : Artech house. [2.2](#)
- [Ulaby et al., 1986] Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1986). Microwave remote sensing, active and passive, volume 3 : From Theory to Applications. Dedham, MA, USA : Artech house. [1.3](#), [3.3](#)
- [Vittucci et al., 2019] Vittucci, C., Laurin, G. V., Tramontana, G., P.Ferrazzoli, Guerriero, L., and Papale, D. (2019). Vegetation optical depth at l-band and above ground biomass in the tropical range : Evaluating their relationships at continental and regional scales. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 77 :151 – 161. [3.1](#)
- [Völksch et al., 2015] Völksch, I., Schwank, M., Stähli, M., and Mätzler, C. (2015). Relief effects on the l-band emission of a bare soil. Remote Sensing, 7(11) :14327–14359. [2.2](#), [2.2](#)
- [Walker and Jetse, 2004] Walker, J.P. and Willgoose, G. R. and Jetse, D. (2004). In situ measurement of soil moisture : a comparison of techniques. Journal of Hydrology, 293(1) :85–99. [A](#)
- [Wang and Choudhury, 1981] Wang, J. R. and Choudhury, B. (1981). Remote sensing of soil moisture content, over bare field at 1.4 ghz frequency. Journal of Geophysical Research : Oceans, 86(C6) :5277–5282. [2.2](#)
- [Wang et al., 1983] Wang, J. R., O’Neill, P. E., Jackson, T. J., and Engman, E. T. (1983). Multifrequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture, and surface roughness. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, (1) :44–51. [2.2](#)
- [Wang et al., 2020] Wang, X., Dannenberg, M. P., Yan, D., Jones, M. O., Kimball, J. S., Moore, D. J., van Leeuwen, W. J., Didan, K., and Smith, W. K. (2020). Globally consistent patterns of asynchrony in vegetation phenology derived from optical, microwave, and fluorescence satellite data. Journal of Geophysical Research : Biogeosciences, 125(7) :e2020JG005732. [2.3](#)

- [Wang et al., 2015] Wang, X., Thompson, D. K., Marshall, G. A., Tymstra, C., Carr, R., and Flannigan, M. D. (2015). Increasing frequency of extreme fire weather in Canada with climate change. Climatic Change, 130(4) :573–586. [4](#)
- [Wehrli et al., 2019] Wehrli, K., Guillod, B. P., Hauser, M., Leclair, M., and Seneviratne, S. (2019). Identifying Key Driving Processes of Major Recent Heat Waves. Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 124(22) :11746–11765. ([document](#))
- [Wiesmann and Mätzler, 1999] Wiesmann, A. and Mätzler, C. (1999). Microwave emission model of layered snowpacks. Remote Sensing of Environment, 70(3) :307–316. [1.3](#)
- [Wigneron et al., 1995] Wigneron, J.-P., Chanzy, A., Calvet, J.-C., and Bruguier, N. (1995). A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields. Remote Sensing of Environment, 51(3) :331–341. [2.5](#)
- [Wigneron et al., 2020] Wigneron, J.-P., Fan, L., Ciais, P., Bastos, A., Brandt, M., Chave, J., Saatchi, S., Baccini, A., and Fensholt, R. (2020). Tropical forests did not recover from the strong 2015–2016 el niño event. Science advances, 6(6) :eaay4603. [3.1](#)
- [Wigneron et al., 2007] Wigneron, J.-P., Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Saleh, K., Escorihuela, M.-J., Richaume, P., Ferrazzoli, P., de Rosnay, P., Gurney, R., Calvet, J.-C., Grant, J. P., Guglielmetti, M., Hornbuckle, B., Mätzler, C., Pellarin, T., and Schwank, M. (2007). L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) Model : Description and calibration against experimental data sets over crop fields. Rem. Sens. Environ., 107 :639–655. [1.3](#), [2.3](#), [2.3](#)
- [Wigneron et al., 2001] Wigneron, J.-P., Laguerre, L., and Kerr, Y. H. (2001). A simple parameterization of the l-band microwave emission from rough agricultural soils. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(8) :1697–1707. [2.2](#), [2.5](#)
- [Wigneron et al., 2021] Wigneron, J.-P., Li, X., Frappart, F., Fan, L., Al-Yaari, A., De Lannoy, G., Liu, X., Wang, M., Le Masson, E., and Moisy, C. (2021). Smos-ic data record of soil moisture and l-vod : Historical development, applications and perspectives. Remote Sensing of Environment, 254 :112238. [1.2](#), [2.5](#)
- [Wigneron et al., 2000] Wigneron, J.-P., Waldteufel, P., Chanzy, A., Calvet, J.-C., and Kerr, Y. (2000). Two-dimensional microwave interferometer retrieval capabilities over land surfaces (smos mission). Remote Sensing of Environment, 73(3) :270–282. [2.4](#), [2.5](#)
- [Wrona et al., 2017] Wrona, E., Rowlandson, T. L., Nambiar, M., Berg, A. A., Colliander, A., and Marsh, P. (2017). Validation of the soil moisture active passive (smap) satellite soil moisture retrieval in an arctic tundra environment. Geophysical Research Letters, 44(9) :4152–4158. [3.3](#)
- [Zribi et al., 2011] Zribi, M., Pardé, M., Boutin, J., Fanise, P., Hauser, D., Dechambre, M., Kerr, Y., Leduc-Leballeur, M., Reverdin, G., Skou, N., et al. (2011). Carols : A new airborne l-band radiometer for ocean surface and land observations. Sensors, 11(1) :719–742. [A](#)